

# 低加速度・長継続時間地震動による 地盤の液状化に関する解析的検討

井澤 淳<sup>1</sup>・上田恭平<sup>1</sup>・室野剛隆<sup>1</sup>

<sup>1</sup>正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail: izawa@rtri.ac.jp, ueda@rtri.ac.jp, murono@rtri.ac.jp

本稿では、有効応力解析を用いて地盤の液状化に与える地震動特性の影響と、低加速度・長継続時間地震動に対する液状化に与える液状化強度曲線の影響を評価した。その結果、液状化層に至るまでの地震動伝搬の特性やサイクリックモビリティの影響で、低加速度・長継続時間地震動の方が有効応力の低下が大きい場合があることが分かった。また、低加速度・長継続時間地震動に対する地盤の液状化に対しては、20回繰返し以上の液状化強度比が大きく影響するため、低加速度・長継続時間地震動に対する液状化の危険性を評価する場合には100回以上の多繰返し領域も含めた液状化強度曲線の形状を把握する必要があることが分かった。

**Key Words :** Soil Liquefaction, Long duration earthquake with low acceleration, Effective stress analysis,

## 1. はじめに

地盤が液状化に至った場合、地盤は地震動を上部へ伝播することが出来ず、上部構造物に作用する慣性力は低減する。一方で、地盤は支持力を失うため、杭基礎をはじめとする基礎構造物は大きく変形させられる可能性があり、液状化の危険性を適切に判定し、液状化程度に応じた設計を行い、構造物の安全性を担保する必要がある。2011年東北地方太平洋沖地震において、東京湾沿岸では低加速度でありながら地震動が長時間継続する低加速度・長継続時間地震動によって、大規模な液状化が広範囲で発生した。したがって、このような地震動に対しても地盤の液状化の危険性および液状化が発生した場合の構造物への影響を適切に評価する必要がある。鉄道構造物等設計標準・耐震設計<sup>1)</sup>(以降、耐震標準)では、対象地盤の液状化強度曲線を用いて累積損傷度法を適用した液状化判定を行うことで地震動の特性をある程度評価出来る体系となっている。筆者ら<sup>2)</sup>は2011年東北地方太平洋沖地震において大規模な液状化の発生したJR新浦安駅周辺の地盤および鉄道高架橋を例に検証を行い、地盤の液状化強度特性を適切に評価できれば、累積損傷度法による液状化判定により実際の地盤の液状化程度を適切に評価できること、耐震標準に示す鉄道構造物の液状化設計手法によって構造物の被害を評価できることを確認している。一方、筆者ら<sup>3)</sup>は1995年兵庫県南部地震において著しい液状化の発生した深江浜の地盤を例とした

有効応力解析を行い、低加速度・長継続時間地震動であっても大振幅の直下型地震と同等の液状化する可能性があることを示した。また、耐震標準に示す累積損傷度法を用いて低加速度・長継続時間地震動に対する液状化判定を行う場合は多繰返し部の液状化強度曲線を精度良く評価する必要があることも示した。2011年東北地方太平洋地震後、地震動の継続時間の影響を考慮した液状化強度比の補正係数について、累積損傷度法を用いた液状化判定による検討<sup>4)</sup>や不規則波を用いた液状化強度試験<sup>5)6)</sup>による検討が行われており、低加速度・長継続時間地震動に対しては道路橋示方書<sup>8)</sup>などで用いられている補正係数よりも小さな値を用いる必要があることなどが報告されている。また、有効応力解析を用いた2011年東北地方太平洋沖地震における東京湾沿岸の液状化の再現解析<sup>例えば 9)10)11)</sup>や、遠心模型実験<sup>12)13)</sup>との比較も行われている。しかしながら、これらは主に現象再現の可能性に主眼を置いた検討であり、低加速度・長継続時間地震動による地盤の液状化のメカニズムについては未解明な部分が多い。

本稿では、有効応力解析を通して大加速度による液状化と低加速度・長継続時間地震動による地盤の応答比較を行い、低加速度・長継続時間地震動で地盤が液状化に至るプロセスを評価した。その上で、液状化強度曲線の影響を整理し、低加速度・長継続時間地震動に対して液状化に至りやすい液状化強度曲線の特性の把握を行った。

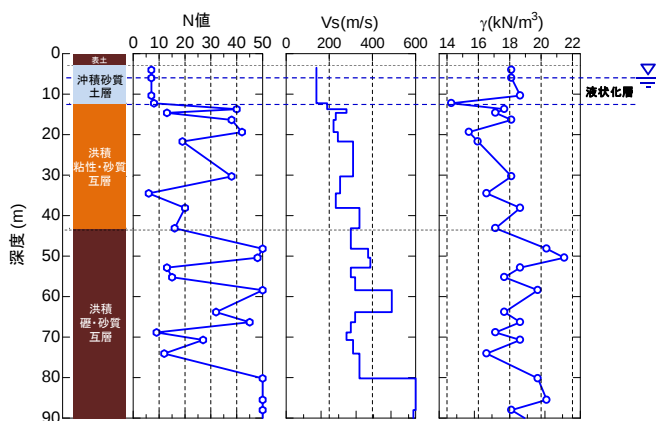


図-1 検討対象地盤の柱状図

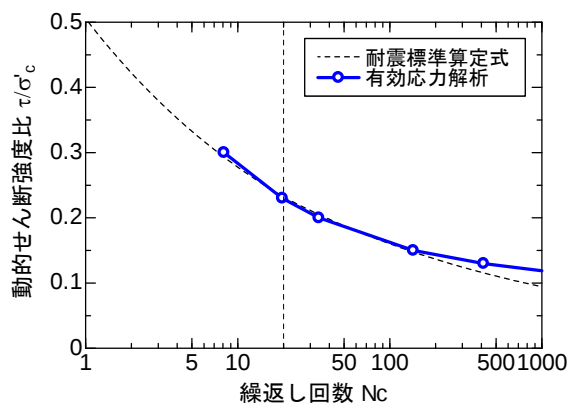


図-2 液状化層の液状化強度曲線

表-1 液状化層の諸元

|      | 下端深度<br>(m) | N値<br>代表値 | γ<br>(kN/m³) | Vs<br>(m/s) | ν     | h <sub>max</sub> | c<br>(kPa) | φ<br>(°) | 液状化パラメータ                                                                   |
|------|-------------|-----------|--------------|-------------|-------|------------------|------------|----------|----------------------------------------------------------------------------|
|      |             |           |              |             |       |                  |            |          | S <sub>l</sub> w <sub>l</sub> p <sub>l</sub> p <sub>l</sub> c <sub>l</sub> |
| 沖積砂層 | 6.00-10.35  | 7         | 18.6         | 140         | 0.495 | 0.24             | 0.00       | 34.6     | 28.0 0.005 11.0 1.0 1.0 1.6                                                |

表-2 検討に用いた地震動の特性 ( )内は浦安波との比)

|           | 最大加速度(gal)  | 加速度パワー(cm²/s³) | 10gal以上の波数 |
|-----------|-------------|----------------|------------|
| スペクトルⅡ    | 943.9(8.47) | 525130(11.5)   | 95         |
| スペクトルⅡ調整波 | 111.5(1.00) | 7407(0.11)     | 59         |
| 浦安波       | 111.5(1.00) | 45726(1.00)    | 304        |
| 苫小牧調整波    | 111.5(1.00) | 68995(1.51)    | 263        |

## 2. 地盤の液状化に及ぼす入力地震動の影響

### (1) 有効応力解析概要

地盤の液状化に与える入力地震動の影響について、図-1に示す地盤を対象して有効応力解析により検討を行った。地表から4～10mの沖積砂層の内、表-1に示すように地下水位6m以下の地盤が液状化の可能性のある地盤と判断される。解析では、マルチスプリングモデル<sup>14)</sup>とIai et al.の過剰間隙水圧モデル<sup>15)</sup>を組み込んだモデルを用い、一次元有効応力解析を行った。ここで、長継続時間地震動に対する液状化を評価する場合は振動中の排水を考慮する必要があると考えられるが、きれいな砂程度の透水係数であれば水圧の上昇に大きく影響を与えないことを確認しており<sup>16)</sup>、本検討では非排水条件で解析を行った。解析モデルに使用したパラメータの設定には地盤調査および試験結果を用いた。なお、液状化層の液状化強度試験は実施されていなかったため、得られているN値および平均粒径等の物性を用いて、耐震標準に示される20回繰り返しの動的せん断強度比 $R_{20}$ の算定式と動的せん断強度比～繰り返し回数の関係式を用いて液状化強度特性を設定し、パラメータフィッティングを行った。図-2に耐震標準に従って設定した動的せん断強度比～繰り返し回数の関係と、有効応力解析による要素シミュレーション結果を示すが、設定した液状化強度特性を概ねモデル化できている。

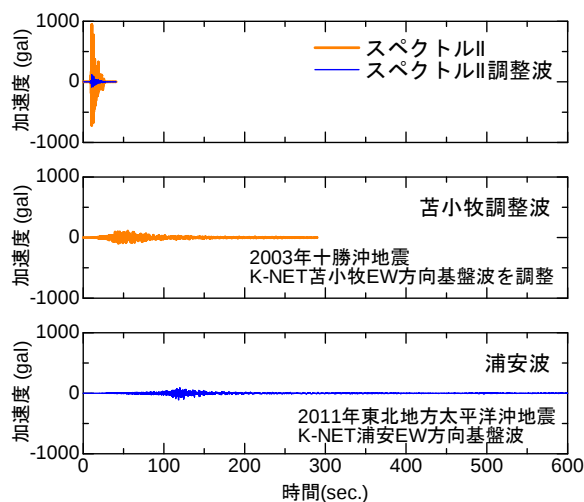


図-3 検討に用いた地震動の時刻歴

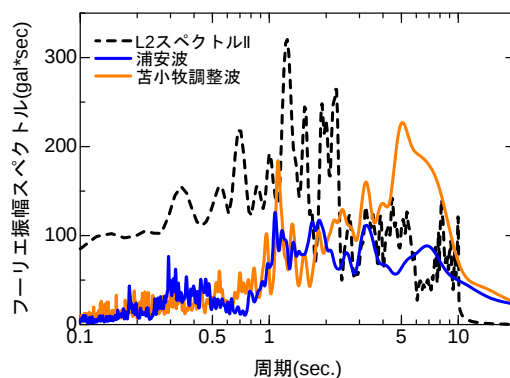


図-4 検討地震動のフーリエ振幅スペクトル

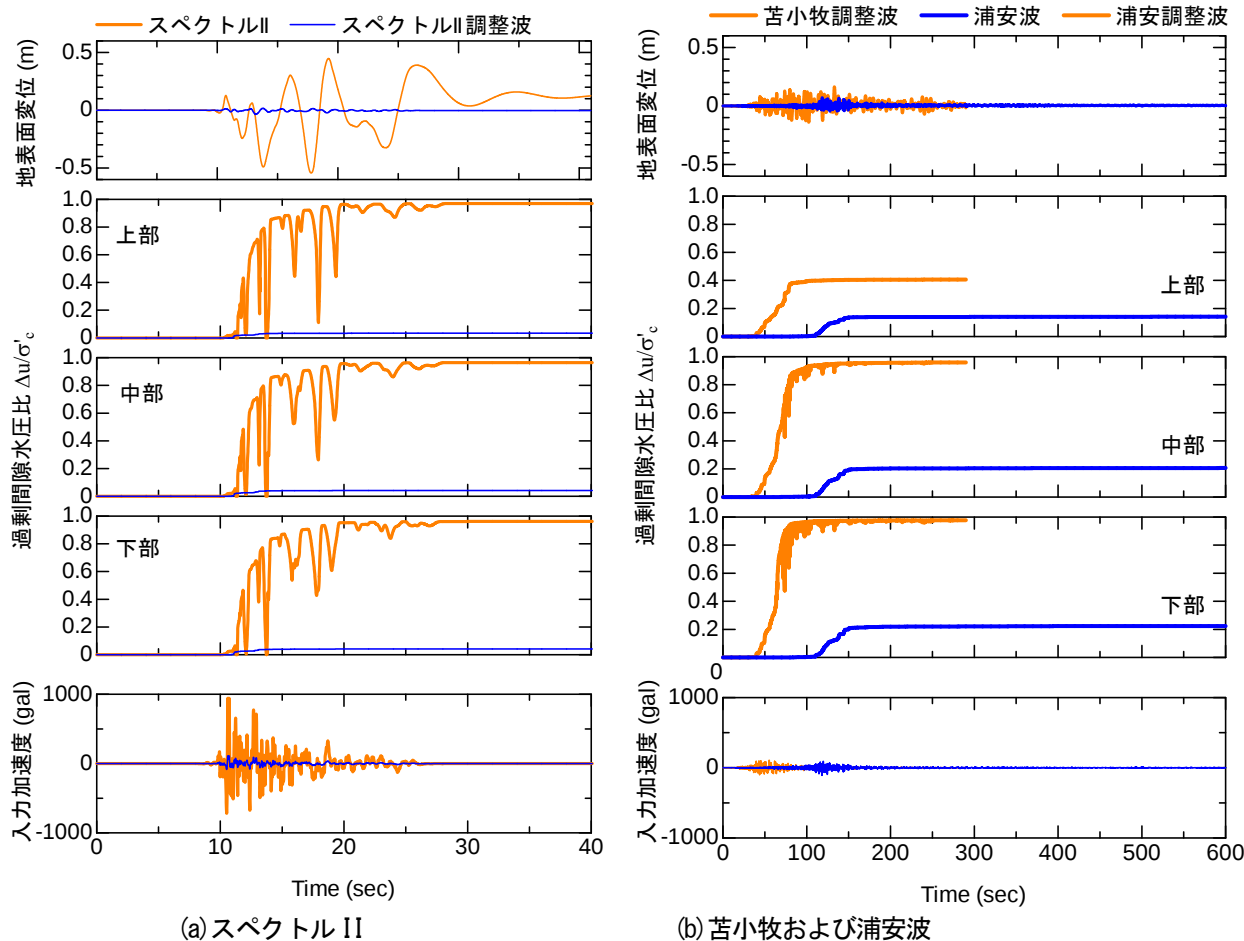


図-5 過剰間隙水圧比および地表面変位の時刻歴

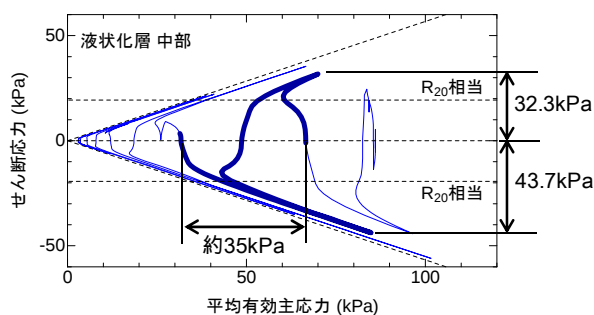
表-2に示すように、代表的な低加速度・長継続時間地震動として2011年東北地方太平洋沖地震におけるK-NET浦安EW方向記録の基盤波（以降、浦安波）と2003年十勝沖地震におけるK-NET苫小牧EW方向記録の基盤波の最大加速度を浦安波と一致させた苫小牧調整波、直下型地震動として耐震標準に示す標準L2スペクトルII地震動（GI地盤）（以降、スペクトルII）とスペクトルIIの最大加速度振幅を浦安波と一致させたスペクトルII調整波の合計4種類の地震動を用いた。図-3にそれぞれの時刻歴を、スペクトルII、苫小牧調整波、浦安波のフーリエ振幅スペクトルを図-4に示す。継続時間は、スペクトルIIで30秒程度であるのに対して、苫小牧調整波では約300秒、浦安波では約600秒であり、苫小牧調整波、浦安波ともに5分以上も続く長継続時間地震動である。フーリエ振幅スペクトルを見ると、苫小牧調整波では約5秒程度の周期が卓越しており、浦安波よりも長周期成分が卓越した地震動であることが分かる。また、表-2に示すように苫小牧調整波は長周期成分が卓越している影響で、浦安波と比較して1.5倍の加速度パワーを有している。

## (2) 過剰間隙水圧の上昇傾向

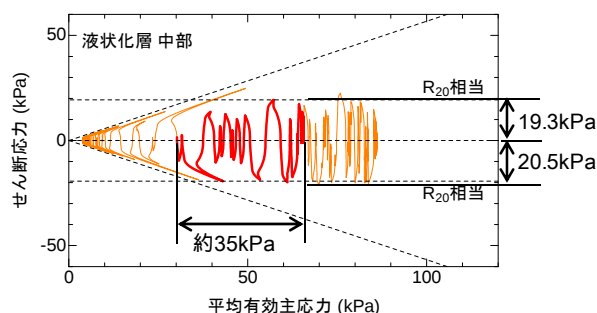
液状化対象層の過剰間隙水圧および地表面水平変位の時刻歴を図-5に示す。直下型地震を想定したスペクトル

IIでは、大きな加速度が入力されることにより、振動開始から10-15秒における約5秒間で過剰間隙水圧比はほぼ1.0まで上昇し、液状化に至っていることが分かる。これに伴い、地表面の水平変位は増幅し、約50cmの変位が生じる結果となっている。それと比較し、最大加速度を浦安波と一致させたスペクトルII調整波の場合、入力加速度が小さく継続時間も短いため、過剰間隙水圧はほとんど生じていない。一方、同じ最大加速度を有する浦安波を入力した場合、110秒程度から小さな加速度振幅であっても振動が長時間継続する間に徐々に水圧が上昇しているが、最終的な過剰間隙水圧比は0.2程度であり、液状化には至っていない。さらに、最大加速度振幅は浦安波と同等であるものの、長周期成分が卓越し、加速度パワーの大きな苫小牧調整波を入力した場合、振動開始後40秒程度から50秒ほどかけて徐々に過剰間隙水圧が上昇し、中部、下部ではほぼ液状化に至っている。

以上から、加速度振幅が小さい場合でも、継続時間が長く、多数の繰り返しを受ける場合、徐々に過剰間隙水圧が上昇し地盤の液状化に至る可能性があることが分かる。特に、長周期成分が卓越した地震動の場合は、大きなパワーを有している場合があり、その可能性が高いと考えられる。



(1) スペクトル II 入力



(2) 苦小牧調整波入力

図-6 液状化層中部の有効応力パス

### (3) 入力波振幅の影響

図-6に液状化層中部での、スペクトルIIおよび苦小牧調整波を入力した場合の有効応力経路を示す。入力加速度はスペクトルIIの方が8倍以上大きいのにに対して、せん断応力で比較すると、最大値同士の比較でも2倍程度である。振幅の大きなスペクトルIIの場合、基盤から液状化層に至るまでの $V_s=200\sim300\text{m/s}$ 程度の層で大きなせん断力を伝達できないため、苦小牧調整波を入力した場合との差が小さくなったと考えられる。

ここで、平均有効主応力65kPa程度からのそれぞれの挙動を太線で示した。スペクトルIIを入力した場合は入力地震動の主要動に対する応答に相当し、片振幅32kPa、43kPaのせん断応力波が半波ずつ入力されているが、サイクリックモビリティが大きく発揮され、約35kPaの有効応力の低下が見られる。一方、苦小牧調整波を入力した場合は片振幅10~20kPa程度の比較的小さいせん断応力が数波入力され、サイクリックモビリティがあまり発揮されないまま、スペクトルIIと同程度の約35kPaの有効応力の低下が見られる。

以上を勘案すると、入力波の振幅が大きく異なったとしても液状化層に至るまでのせん断応力の伝播やサイクリックモビリティ発揮の有無により、低加速度・長継続時間地震動であっても、大振幅の直下型地震と同等の液状化が発生する可能性があると言える。

### (4) 低加速度地震動に対する液状化現象

図-7に浦安波と苦小牧調整波を入力した場合に液状化層中部に作用するせん断応力と過剰間隙水圧比の時刻歴

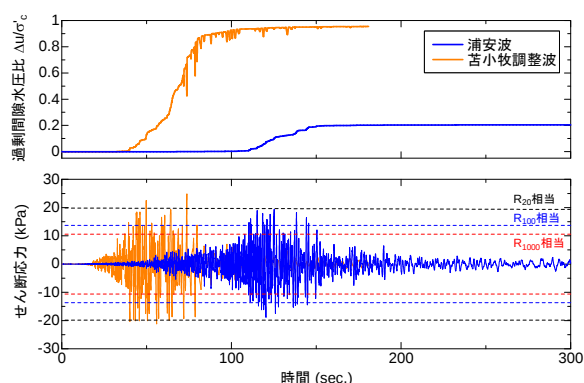
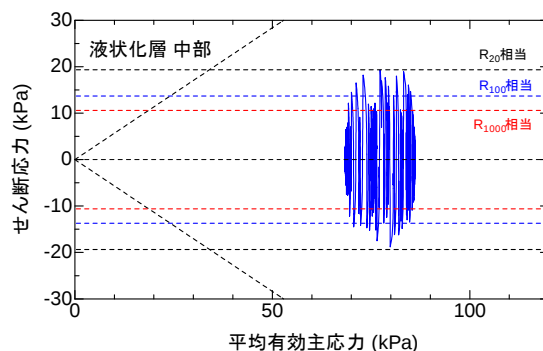
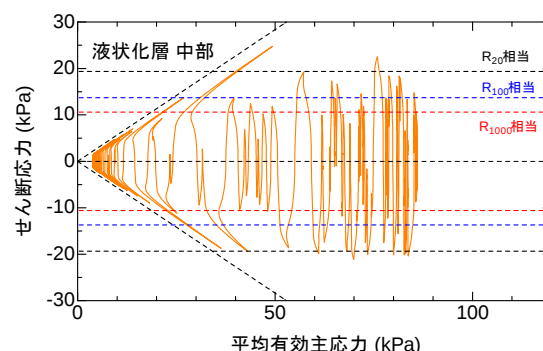


図-7 液状化層中部に作用するせん断応力比時刻歴  
(浦安波, 苦小牧調整波入力)



(1) 浦安波入力



(2) 苦小牧調整波入力

図-8 液状化層中部の有効応力パス  
(浦安波, 苦小牧波入力)

を示す。図中には $R_{20}$ 、 $R_{100}$ 、 $R_{1000}$ に相当するせん断応力を示しているが、おおむね $R_{1000}$ を超えるせん断応力が作用すると水圧が上昇している。図-8には、それぞれの有効応力パスを示す。浦安波入力時に比べて苦小牧調整波入力時のせん断応力は1割程度大きいだけであるが、間隙水圧の上昇量は5倍程度異なる。また、苦小牧調整波を入力した場合に $R_{20}$ 相当のせん断応力を超えることが数回見られるが、 $R_{100}\sim R_{1000}$ 程度のせん断応力波で有効応力が低下している。以上より、 $R_{100}\sim R_{1000}$ 相当のせん断応力波の小さな差により、液状化発生の有無が左右されることが分かる。

表-3 多繰返し領域の特性が異なる  
液状化強度曲線で設定した液状化パラメータ

|       | 液状化パラメータ           |       |       |       |       |       |
|-------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|       | $\phi_1(^{\circ})$ | $S_1$ | $w_1$ | $p_1$ | $p_1$ | $c_1$ |
| Case1 | 28.0               | 0.005 | 10.0  | 0.4   | 0.8   | 1.8   |
| Case2 | 28.0               | 0.005 | 10.0  | 0.4   | 0.8   | 2.2   |
| Case3 | 28.0               | 0.005 | 10.0  | 0.4   | 0.8   | 2.5   |

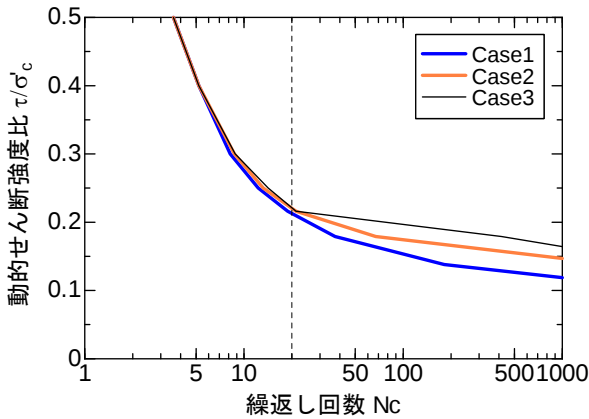


図-9 有効応力解析に用いた多繰返し領域の特性が異なる液状化強度曲線

### 3. 液状化強度曲線の影響

2に示したように、低加速度・長継続時間地震動に対しては、サイクリックモビリティが大きく発揮されない比較的小さなせん断応力比が繰返し作用することで液状化に至る可能性があること、 $R_{100}$ ~ $R_{1000}$ 相当のせん断応力波の小さな差により、液状化発生の有無が左右されることが分かった。したがって、これまで重要視していなかった、小さな繰返し応力振幅で多数の繰返しを受けた場合の液状化強度特性を把握しておく必要があると考えられる。そこで2(1)で示したモデル地盤の液状化層に対して、図-9に示すような繰返し回数20回以降の多繰返し領域での液状化強度特性が異なる液状化強度特性を持たせた3種類のモデルを作成し、浦安波を入力してその影響を評価した。表-3に各ケースで設定した過剰間隙水圧の上昇を制御するパラメータを示したが、 $c_1$ のみを変化させている。今回用いた有効応力モデルでは、過剰間隙水圧の上昇は地盤に作用する全せん断仕事から弾性せん断仕事を差し引いた塑性せん断仕事に応じて計算されるが、式(1)に示すように弾性せん断仕事の寄与度を $c_1$ で制御している。

$$dW_s = dW_{st} - c_1 dW_{se} \quad (1)$$

ここで、 $dW_s$ ：塑性せん断仕事、 $dW_{st}$ ：全せん断仕事、 $dW_{se}$ ：弾性せん断仕事である。すなわち、 $c_1$ の値が小さいほど、弾性せん断仕事の寄与度が大きくなる。言い換えると、 $c_1$ の小さい地盤ほど低せん断応力による過剰間隙水圧の上昇が大きく、低加速度・長継続時間地震動に

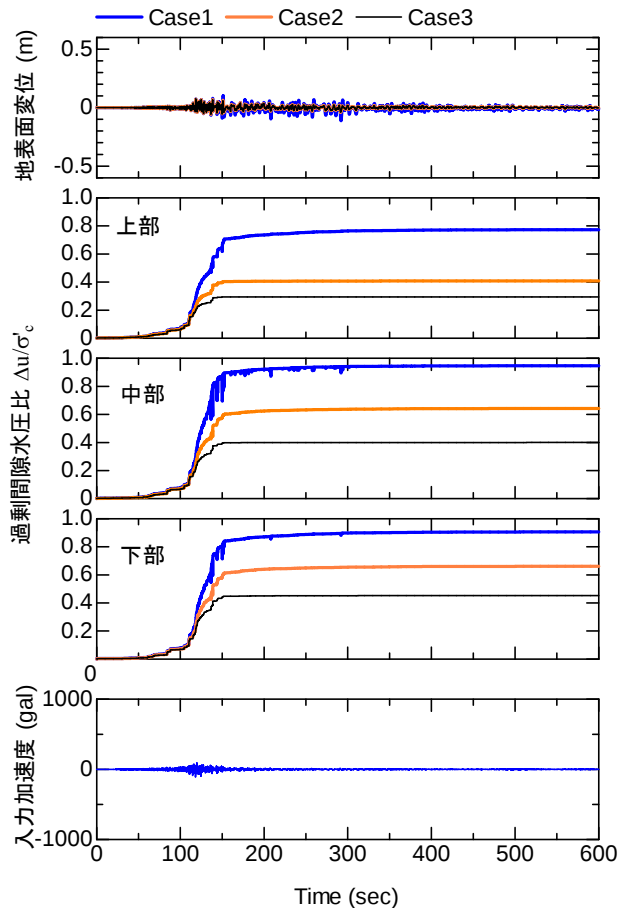


図-10 多繰返し領域の強度特性の異なる液状化層の過剰間隙水圧の上昇傾向の比較

対して液状化に至りやすい地盤になると考えられる。したがって、図-9に示すように $c_1$ の小さいCase1で、多繰返し領域の液状化強度比は小さくなっている。

図-10に浦安波を入力した場合の過剰間隙水圧比の時刻歴を示すが、20回よりも少ない繰返し領域での液状化強度特性が同等の地盤であっても、多繰返し領域の液状化強度の小さな差により発生する過剰間隙水圧が大きく異なり、多繰返し領域の液状化強度比の小さいCase1で最も大きな過剰間隙水圧が発生し、ほぼ液状化に至っている。また、図-11にはそれぞれのケースでの液状化層中部での有効応力パスをそれぞれの $R_{20}$ と $R_{1000}$ と共に示した。 $R_{1000}$ を下回るようなせん断応力でも有効応力は減少するが各ケース毎に大きな差はなく、大きく有効応力が減少しているのは $R_{20}$ ~ $R_{1000}$ の範囲であることが分かる。したがって、 $R_{20}$ は同等であっても $R_{1000}$ の小さいCase1で有効応力の低下が大きく生じている。

以上を勘案すると、一般的な液状化試験においては繰返し回数10~50回に対する液状化強度比を求めるが、低加速度・長継続時間地震動に対する液状化の危険性を評価する場合には、100回以上の多繰返し領域も含めた液状化強度曲線の形状を把握する必要があると考えられる。

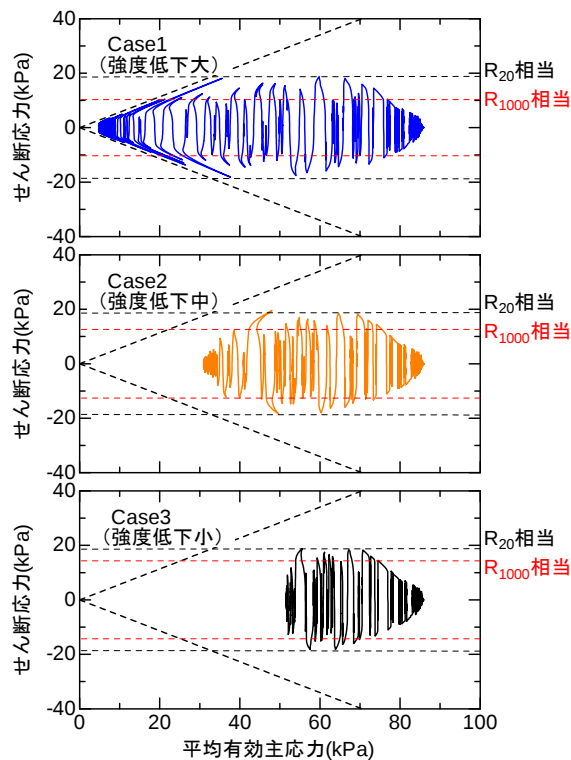


図-11 多繰返し領域の強度特性の異なる液状化層の有効応力パスの比較

## 5. まとめ

本稿では、有効応力解析を用いて地盤の液状化に与える地震動特性の影響と、低加速度・長継続時間地震動に対する液状化に与える液状化強度曲線の影響を評価し、以下の知見を得た。

- (1) 液状化層に至るまでのせん断応力の伝播特性や液状化層でのサイクリックモビリティ発揮の有無により、低加速度・長継続時間地震動であっても、大振幅の直下型地震と同等の液状化が発生する可能性がある。
- (2) 低加速度・長継続時間地震動に対する地盤の液状化に対しては、20回繰返し以上の液状化強度比が大きく影響する。低加速度・長継続時間地震動に対する液状化の危険性を評価する場合には、100回以上の多繰返し領域も含めた液状化強度曲線の形状を把握する必要がある。

## 参考文献

- 1) (公財) 鉄道総合技術研究所, 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, 2012.
- 2) 井澤 淳, 室野剛隆, 西岡英俊, 今井 勉, 和田旭弘, 低加速度・長継続時間地震動による地盤の液状化とその評価方法, 鉄道総研報告, 第26巻, 第11号, pp.11-16, 2012.

- 3) 井澤 淳, 田上和也, 室野剛隆, 各種の地震動に対する累積損傷度法による液状化判定法の適用性, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 68, No.4, pp.260-267, 2012
- 4) 安田 進, 萩谷俊吾, 地震動特性に関する補正係数  $C_w$  が液状化判定結果に与える影響の試算, 第47回地盤工学研究発表会, pp.786-787, 2012.
- 5) 佐々木翼, 東畑郁生, 山田 卓, 多サイクル地震動に対する  $C_w$  値評価のための実験的研究, 第47回地盤工学研究発表会, pp.401-402, 2012.
- 6) 安田 進, 石川敬祐, 青柳貴是, 東京湾エリアで液状化した砂の強度や変形特性の影響要因に関する研究, 第47回地盤工学研究発表会, pp.403-404, 2012.
- 7) 岩國英紀, 遠藤正悟, 永瀬英生, 廣岡明彦, 継続時間の長い不規則荷重を受ける砂質土の影響が特性, 土木学会第67回年次学術講演会, III-019, pp.37-38, 2012.
- 8) 日本道路境界, 道路橋示方書 (V耐震設計編)・同解説, 2012.
- 9) 福武毅芳, 張至鎬, 2011年東北地方太平洋沖地震における浦安地区の地盤の有効応力解析による検討, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 68 (2012) No. 4 p. I\_293-I\_304
- 10) 船原英樹, 石崎定幸, 長尾俊昌, 東北地方太平洋沖地震において液状化程度に違いが生じた2地点の有効応力解析その1 検討対象と解析方法, 第47回地盤工学研究発表会, pp.1583-1584, 2012.
- 11) 石崎定幸, 船原英樹, 長尾俊昌, 東北地方太平洋沖地震において液状化程度に違いが生じた2地点の有効応力解析—その2 解析結果と液状化程度に違いが生じた要因—, 第47回地盤工学研究発表会, pp.1585-1586, 2012.
- 12) 金田菜都美, 船原英樹, 長尾俊昌, 継続時間の長い地震動による地盤の液状化に関する遠心振動実験, その1 実験概要, 第48回地盤工学研究発表会, pp.1725-1726, 2013.
- 13) 船原英樹, 金田菜都美, 長尾俊昌, 継続時間の長い地震動による地盤の液状化に関する遠心振動実験, その2 有効応力解析によるシミュレーション, 第48回地盤工学研究発表会, pp.1727-1728, 2013.
- 14) Towhata, I. and Ishihara, K., Modeling soil behavior under principal stress axes rotation, Proc. of 5th International Conf. on Num. Methods in Geomechanics, Nagoya, Vol.1, pp.523-530, 1985.
- 15) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, Soils and Foundations, Geotechnical Society, Vol. 32, No.2, pp.1-15, 1992.
- 16) 上田恭平, 井澤 淳, 室野剛隆, 長継続時間地震動を受ける地盤の液状化に及ぼす透水性の影響, 第48回地盤工学研究発表会, pp.1737-1738, 2013.