

低加速度・長継続時間地震動による地盤の液状化の評価

井澤 淳¹・上田恭平¹・室野剛隆¹

¹正会員 博士（工学）（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）

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。ところで、2011年東北地方太平洋地震において、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¹⁾（以降、耐震標準）では、対象地盤の液状化強度曲線を用いて設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²⁾は2011年東北地方太平洋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。しかしながら、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や様々な地震動に対する累積損傷度法の適用性、地盤の物性や液状化強度特性の影響等については未解明な部分が多い。

一方、筆者ら³⁾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⁴⁾や不規則波を用いた液状化強度試験⁵⁾⁶⁾⁷⁾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⁸⁾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。さらに安田ら⁹⁾は筆者らと同様に累積損傷度法を用いる場合の液状化強度曲線の形状の影響についても言及しており、地盤の液状化に対する地震動の影響を評価する際には、20回繰返しの液状化強度比 R_{20} だけでなく液状化強度曲線を評価する必要があることが分かる。また、2011年東北地方太平洋地震において液状化が発生した東京湾沿岸の地盤は、シルトに分類されるような細粒分含有率 F_c が高く、粒径分布が比較的なだらかな均等係数 U_c の大きな地盤であったことが多数報告されている^{例えば 10)11)12)}。したがって、このような地盤は低加速度・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を有している可能性がある。

本稿では、有効応力解析を通して地盤の液状化に与える入力地震動および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。その上で、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特性を有する地盤の物性について、特に粒径分布に着目して液状化強度試験を行い、検討した。最後に、低加速度・長継続時間地震動による液状化に至りやすい地盤の評価法および耐震設計における評価法についてまとめた。

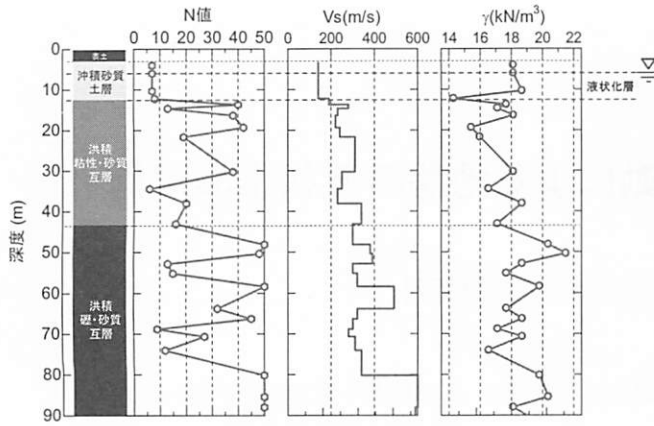


図-1 検討対象地盤の柱状図

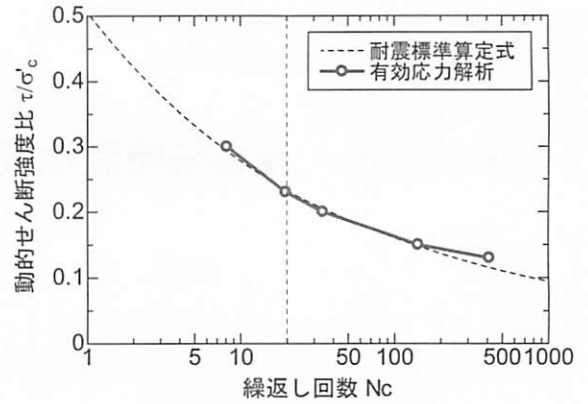


図-2 液状化層の液状化強度曲線

表-1 液状化層の諸元

下端深度 (m)	N 値 代表値	γ (kN/m ³)	Vs (m/s)	ν	h _{max}	c (kPa)	φ (°)	液状化パラメータ φ _b (°) S ₁ w ₁ p ₁ p ₁ c ₁
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 ()内は浦安基盤波と比

	最大加速度(gal)	加速度パワー(cm ² /s ³)	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. 低加速度・長継続時間地震動による地盤の液状化の解析的検討

(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¹³⁾とIai et al.の過剰間隙水圧モデル¹⁴⁾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。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。

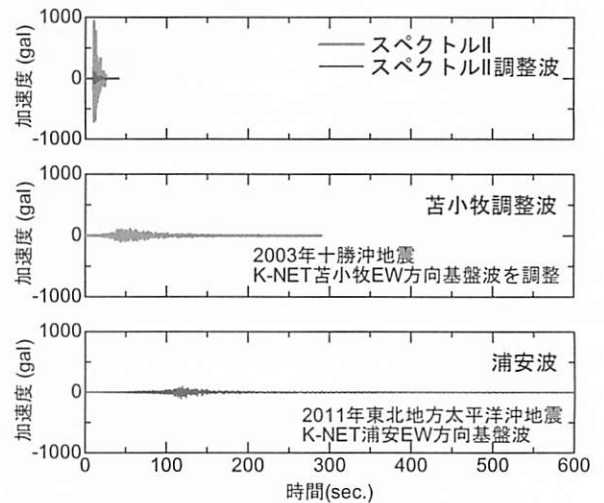


図-3 検討に用いた地震動の時刻歴

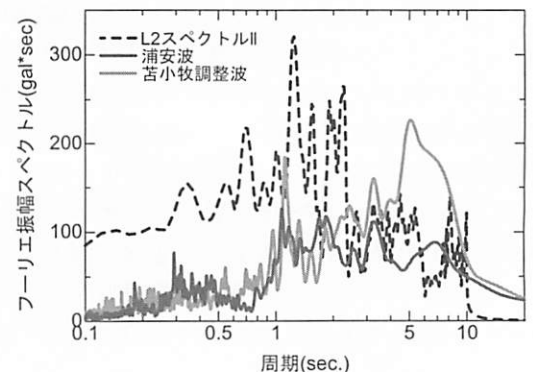
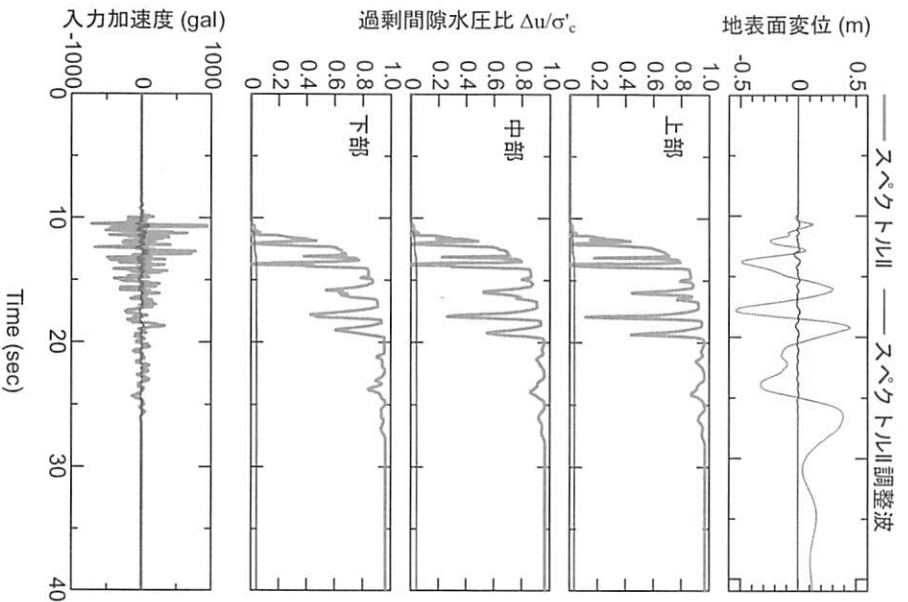
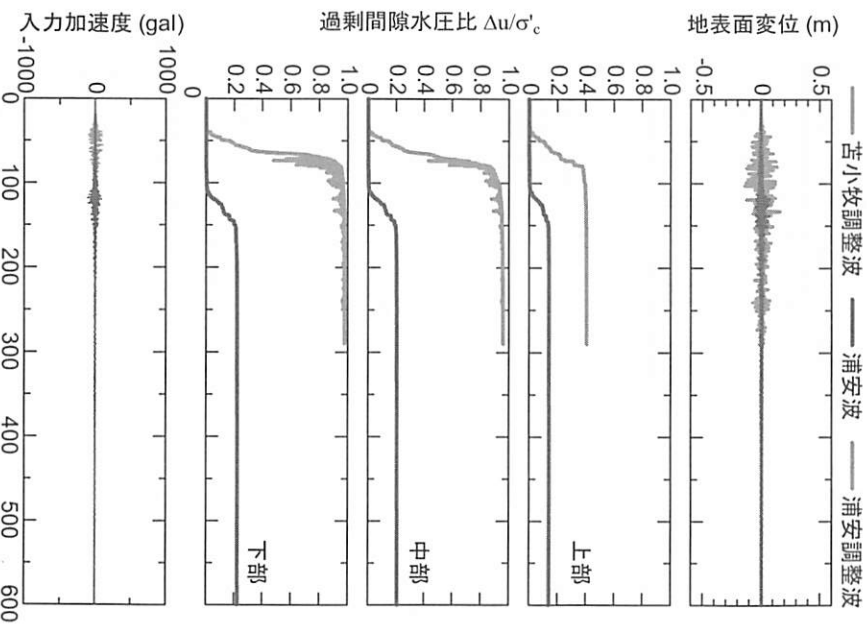


図-4 検討地震動のフーリエ振幅スペクトル



(a) スペクトルII



(b) 苫小牧および浦安波

図-5 過剰間隙水圧比および地表面変位の時刻歴

(2) 地震動特性の影響

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。

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、下部でほぼ液状化に至っている。なお、加速度パワーを苫小牧波と一致させた浦安調整波でも同様に液状化に至っている。

表-3 多繰り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					
	$\phi_s(^{\circ})$	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

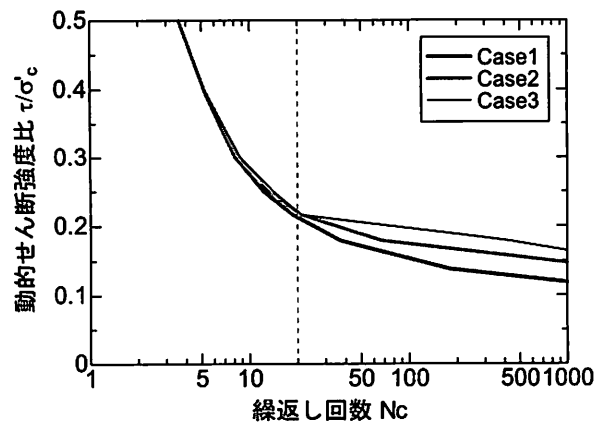


図-6 有効応力解析に用いた多繰り返し領域の特性が異なる液状化強度曲線

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。

(3) 液状化強度曲線形状の影響

2(2)に示したように、低加速度であっても地震動が長周期・長継続時間化した場合は、地盤の液状化の危険性が高まると考えられる。この場合、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り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-6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。

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

ここで、 dW_s ：塑性せん断仕事、 dW_{sl} ：全せん断仕

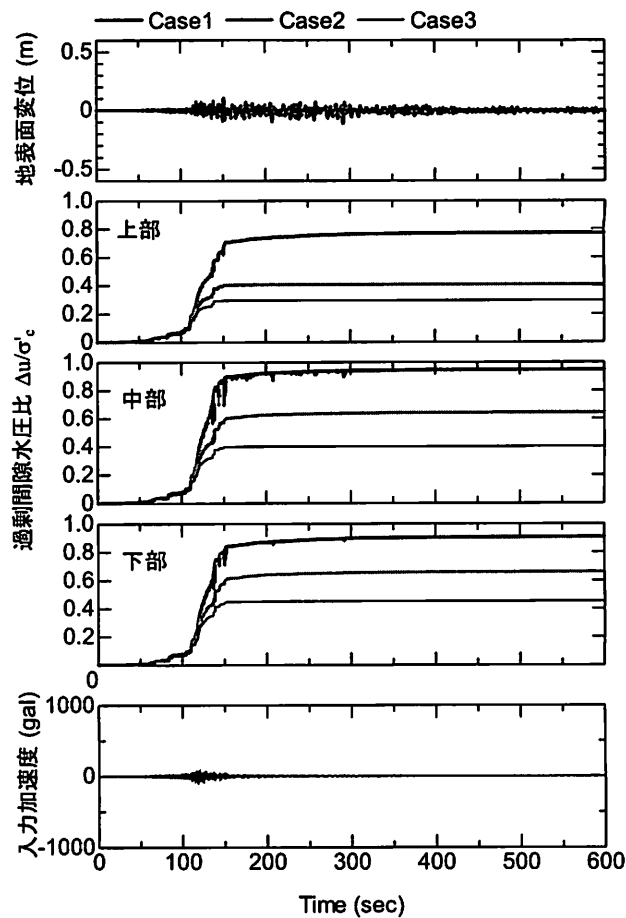


図-7 多繰り返し領域の強度特性の違いが過剰間隙水圧の上昇に与える影響

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-6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-7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。したがって、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。

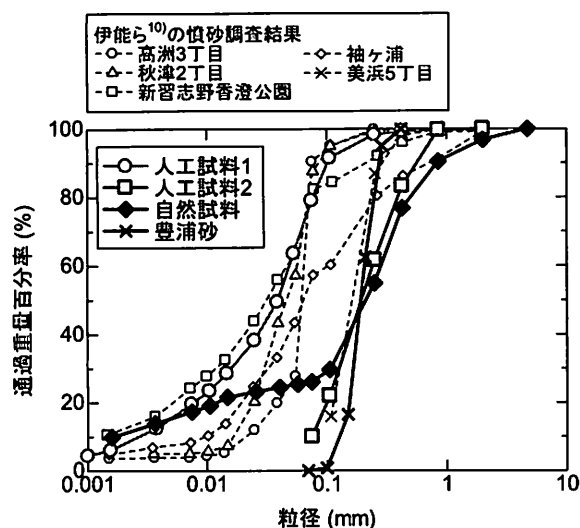


図-8 試験に用いた試料の粒径分布

表-4 液状化試験に用いた試料の物性

試料名	D ₅₀ (mm)	U _c	U _c '	F _c (%)	P _c (%)	e _{max}	e _{min}
人工試験1	0.039	17.4	1.82	79.1	15.3	1.50	0.765
人工試験2	0.190	5.46	1.76	22.0	3.20	1.19	0.635
自然試験	0.215	172.3	24.8	26.1	15.3	1.13	0.570
豊浦砂 ⁴⁾	0.190	1.32	—	0	0	0.989	0.615

表-5 液状化試験の実施密度（全ケースの平均値）

実験ケース	Dr(%)	単位体積重量(kN/m ³)		間隙比
		乾燥γ _d	飽和γ _{sat}	
人工試験1	91.2	14.1	18.6	0.832
人工試験2	85.8	15.1	19.2	0.720
自然試験	64.9	14.6	18.9	0.469

3. 液状化強度特性に与える地盤物性の影響

(1) 液状化強度曲線

上記の通り、多繰返し領域の液状化強度比が小さい地盤は、低加速度・長継続時間地震動に対して液状に至りやすいと考えられる。ここで、2011年東北地方太平洋沖地震において、東京湾沿岸では粒径が細かく、粒径分布が比較的なだらかなシルト質の地盤でも液状化が発生した可能性があることが報告されている^{例え10)11)12)}。一般的に、このような物性を有する地盤では20回繰返しの液状化強度比R₂₀が大きく、液状化に至りにくいとされているが、わずか150gal程度の長継続時間地震動で液状化に至ったことになる。したがって、20回繰返しの液状化強度比R₂₀は大きいものの多繰返し領域の液状化強度比が小さい、すなわち、長継続時間地震動に対して液状化しやすい多繰返し領域の液状化強度特性を有していた可能性がある。そこで、地盤物性、特に粒径分

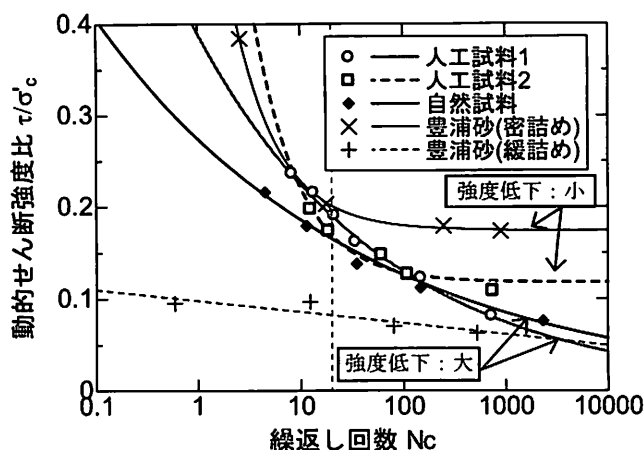


図-9 試験から得られた液状化強度曲線

布に着目し、多繰返し領域の液状化強度特性に与える影響を液状化強度試験から考察した。

(2) 液状化強度試験概要

液状化強度試験では、表-4に示す3種類の材料を対象として行った。また、過去の豊浦砂の実験結果¹³⁾を用いて比較を行った。ここで、人工試験1および2については藤森粘土をベースとしてケイ砂6号と7号を配合調整することによって粒径分布を調整して作成している。豊浦砂は平均粒径D₅₀が0.2mm程度の均等係数U_cの小さい単粒度の砂であるのに対して、人工試験2および自然試験は豊浦砂と同等の平均粒径D₅₀を有し、粒径分布をなだらかにしたものである。一方、人工試験1は人工試験2に似た粒径分布形状を有したまま、粒径の細くなる方向へシフトした材料である。図-8に粒径加積曲線を、表-4に物性を示す。図-8には伊能ら¹⁰⁾の調査により得られている東京湾沿岸の慣砂の粒径分布も示すが、人工試験1に近い粒径分布を有する地盤が多く、このような地盤で低加速度・長継続時間地震動による液状化が発生したと考えられる。

液状化強度試験は、中空ねじり試験機を用いて表-5に示す密度で行った。人工試験の密度は出来るだけ密になるように、自然試験は再構成して自然状態と同じ密度になるように調整している。供試体寸法は外径200mm、内径120mm、高さ300mmで、拘束圧98kPa（背圧200kPa）で等方圧密後、0.1Hzの正弦波で繰返し载荷を行い、繰返し回数1～1000回程度の範囲において5～6点の液状化強度比を求めた。なお、せん断ひずみ7.5%到達時を液状化発生時とした。

(3) 試験結果および考察

図-9に、液状化試験から得られた動的せん断強度比と繰返し回数の関係を過去の豊浦砂の試験結果¹³⁾とともに示した。なお、豊浦砂(Dr=61%および

表-6 異なる地震動を与えた場合の
液状化判定結果と有効応力解析の比較

	最大加速度 (gal)	過剰間隙水圧比 (有効応力解析)	PL 値
スペクトルⅡ	943.9	0.965	28.6
スペクトルⅡ調整波	111.5	0.039	0.00
苫小牧調整波	111.5	0.930	10.2
浦安波	111.5	0.190	4.06

80%)の結果は三軸試験装置を用いた結果であるため、既往の研究¹⁵⁾を参考に1.2倍した値を示している。一般的に液状化に至りやすいとされる単粒度の砂では、緩詰めの場合は繰り返し回数に対して傾きの小さい直線関係があり、密詰めの場合は繰り返し回数の少ない領域で急激な強度低下があるものの、繰り返し回数20回以降ではほとんど強度低下がない傾向がある。図-9に示す豊浦砂の場合に、この傾向が顕著に見られている。豊浦砂と同等の平均粒径を持ち、粒径分布の勾配をなだらかにした密詰めの人工試料2についても、繰り返し回数20~100回での強度低下見られるものの、その後の低下は小さいことがわかる。一方、自然材料は20回繰り返しの液状化強度比 R_{20} は人工試料2と同等であるが、繰り返し回数100回を超えても強度低下が比較的大きい。また、人工試料2と同等の粒径分布の勾配を有し、粒径の細かい人工試料1の場合、繰り返し回数20回での液状化強度比は密な豊浦砂と同程度であるものの、繰り返し回数の増加とともに大きな強度低下を示し、多繰返し領域での液状化強度比が小さくなっている。

以上より、粒径が細かく、なだらかな粒径分布を有する地盤の場合、多繰返し領域での液状化強度の低下が大きく、低加速度でありながら長時間繰返し载荷を受けることにより液状化に至る危険性があると言える。人工試料1は図-8に示した憤砂の粒径分布とほぼ同等であることから、多繰返し領域での液状化強度の低下が大きい地盤に長継続時間地震動が作用したことが、2011年東北地方太平洋沖地震における東京湾沿岸の大規模な液状化の発生の原因の一つと考えられる。

4. 低加速度・長継続時間地震動に対する地盤の液状化の評価法

(1) 低加速度・長継続時間地震動に対して液状化に至る可能性ある地盤の評価

以上の検討から、低加速度であっても、継続時間の長い地震動の場合、地盤が液状化に至る可能性があり、特に大きなパワーを有する可能性のある長周

期地震動の場合に、その危険性が高いことが分かった。また、このような地震動に対しては多繰返し領域の液状化強度が小さい地盤が液状化に至りやすいこと、特に粒径が細かく、粒径分布のなだらかな地盤で多繰返し領域の液状化強度の低下が大きいため、注意が必要である。しかしながら、今回の実験では粒度調整した人工材料または再構成した自然試料を用いており、粘着力が無い条件で実験行っている。このような粒径の細かい、粒径分布のなだらかな地盤は、年代効果により粘着力が増加し、それに伴う液状化抵抗の増加が期待できると考えられる^(例えば16)。実際、2011年東北地方太平洋沖地震において液状化の発生した東京湾沿岸の地盤は、1945年以降に浚渫された若い浚渫土であり、戦前に埋め立てられた地盤は液状化に至らなかったことが報告されている^{(例えば17)(18)(19)}。以上を考慮すると、粒径が細かく、粒径分布のなだらかな材料で、かつ比較的近年に埋め立てられた地盤の場合に、低加速度・長継続時間地震動に対する液状化の発生を懸念する必要があると言える。

(2) 低加速度・長継続時間地震動に対する地盤の液状化の評価法

鉄道構造物の設計においては、耐震標準に示す累積損傷度法を用いた液状化判定を行っており、地震動の継続時間をある程度考慮できる体系となっている。表-6に、4.2で実施した有効応力解析で用いた液状化地盤を用いて、有効応力解析で用いた地震動に対して液状化判定した結果を示した。ここで、液状化地盤に作用するせん断応力比は、各地震動を基盤波として、地盤の非線形性にGHE-Sモデル²⁰⁾を用いた全応力解析から得られた地表面地震動を用いて、耐震標準に示すせん断応力比の算定式を用いて求めている。得られた P_L 値は、有効応力解析から得られた過剰間隙水圧の上昇程度、すなわち液状化程度と相関があり、累積損傷度法を用いた液状化判定により、低加速度・長継続時間地震動に対する液状化の危険性を判定できると考えられる。

ただし、上記の液状化判定では、有効応力解析と液状化判定で用いた液状化強度曲線が同等であったため、同等の液状化危険性を判定出来たと考えられる。低加速度・長継続時間地震動に対して累積損傷度法を用いた液状化判定を適用する場合、多繰返し領域の液状化強度比に大きく依存するため、液状化強度曲線の形状を把握しておく必要がある。

以上をまとめると、粒径分布が細かく、なだらかな材料で、かつ比較的近年に埋め立てられた地盤の

場合に、低加速度・長継続時間地震動に対する液状化の発生を懸念する必要があるが、耐震標準に示す液状化判定手法により液状化の危険性を判定出来る。その際、多繰り返し領域も含めた液状化強度特性を求める必要があるため、10回～50回程度の繰り返し回数を対象とした通常の液状化試験を行うとともに、動的せん断応力比を0.1程度に設定した試験を別途行い、多繰り返し領域における液状化強度を算定し、液状化強度曲線形状を把握する必要がある。

なお、表-6から分かるように標準L2地震動に対してはより顕著な液状化に至ると判定されることから、標準L2地震動を用いて液状化判定および液状化を考慮した設計を行えば、低加速度・長継続時間地震動により液状化に至った地盤中の構造物の安全性も担保されると判断できると言える。

5. まとめ

本稿では、有効応力解析を通して地盤の液状化に与える入力地震動および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するとともに、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特性を有する地盤の物性について、特に粒径分布に着目して液状化強度試験を行い検討を行った。その結果、長周期・長継続時間地震動が表層地盤の液状化に与える影響について検討した結果、粒径が細かく、粒径分布のなだらかな材料で、比較的近年に埋め立てられた地盤の場合、低加速度であっても長時間継続する地震動によって液状化が発生する可能性があることが分かった。このような液状化の危険性は、鉄道構造物等設計標準・耐震設計に示す累積損傷度法を用いた液状化判定手法により危険性を判定出来る。ただし、多繰り返し領域も含めた液状化強度特性を求める必要があるため、通常の液状化試験を行うとともに動的せん断応力比を0.1以下に設定した試験を別途行い、多繰り返し領域も含めた液状化強度曲線形状を把握する必要がある。なお、標準L2地震動を用いて液状化判定および液状化を考慮した設計を行えば、長周期・長継続時間地震動により液状化に至った地盤中の構造物の安全性も確保できると言える。

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か特性, 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) 安田進, 萩谷俊吾, 長継続時間地震動に対する累積損傷度法による地震動特性に関する係数 C_w の算出, 土木学会第 67 回年次学術講演会, III-204, pp. 407-408, 2012.
- 10) 伊能清貴, 渡辺綱, 青柳貴是, 小澤直輝, 安田 進, 東日本大震災における東京湾岸の液状化発生地域の現地調査, 土木学会第 66 回年次講演会, pp. 1105-1106, 2011.
- 11) 森垣大佳, 山田雅一, 2011 年東北地方太平洋沖地震による液状化被害調査ー憤砂の粒度特性と液状化被害状況ー, 第 47 回地盤工学研究発表会, pp.113-114, 2012.
- 12) 近藤康人, 清田 隆, 京川裕之, 東北地方太平洋沖地震において発生した憤砂の液状化強度特性, 第 47 回地盤工学研究発表会, pp.1609-1610, 2012.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 青野哲成, 三浦清一, 土岐祥介, 山下 聡, 飽和砂の

- 限界液状化強度，土木学会第 41 回年次講演会，pp. 9-10, 1986.
- 16) 田中泰雄，松本正暁，川嶋篤司，川崎健司，三軸試験と中空ねじり試験の液状化強度の相違の検討，神戸大学都市安全研究センター研究報告，第 3 号，pp. 129-135, 1999.
- 17) Tatsuoka, F., Kato, H., Kimura, M. & Pradhan, T.B.S., Liquefaction strength of sands subjected to sustained pressure, *Soils and Foundations*, Vol.28, No.1, pp. 119-131, 1988.
- 18) 安田 進, 高野務, 金丸功希, 橋本 尚, 萩谷俊吾, 東日本大震災で液状化した東京湾岸の埋立歴史と土層断面図，土木学会第 66 回年次学術講演，pp. 1113-1114, 2011.
- 19) 安田進，石川敬祐，高野 務，中畝翔太，東日本大震災における液状化地点と埋立て履歴の関係，第 47 回地盤工学研究発表会，pp.1691-1692, 2012.
- 20) 田口雄一，東畑郁生，青山翔吾，大坪正英，東北地方太平洋沖地震による東京湾周辺地帯の液状化に基づく年代効果の検討，第 47 回地盤工学研究発表会，pp.1603-1604, 2012.
- 21) 室野剛隆，野上雄太，S 字型の履歴曲線の形状を考慮した土の応力～ひずみ関係，第 12 回日本地震工学シンポジウム，pp. 494-497, 2006.