

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

井澤 淳¹・田上和也²・室野剛隆³

¹ (公財) 鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail:izawa@rtri.or.jp

² ジェイアール東海コンサルタンツ(株) (〒450-0002 愛知県名古屋市中村区名駅5-33-10)

E-mail:k-tanoue@jrcc.co.jp

³ (公財) 鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail:murono@rtri.or.jp

本稿では、各種の地震動に対する累積損傷度法による液状化判定の適用性について検討することを目的とし、有効応力解析との比較を行っている。まず有効応力解析により、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ことを示した。このような液状化現象を累積損傷度法により評価する場合は、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を示した。また、累積損傷度法によって液状化に至るまでの地盤に作用するせん断応力比をある程度評価できること、過剰間隙水圧の上昇傾向を累積損傷度Dの増加傾向で評価できることが分かった。ただし、過剰間隙水圧の上昇による剛性低下を考慮していないため、液状化発生後のせん断応力を過大に算定してしまい、過剰に液状化する判定を与えてしまう可能性があることも示した。

Key Words : Soil liquefaction, Accumulated damage parameter, Effective stress analysis, Long period and long duration earthquake

1. はじめに

筆者ら¹⁾²⁾は巨大地震発生時に危惧されている長継続時間地震動に対する地盤の液状化問題について検討を行ってきたが、2011年東北地方太平洋地震において、低加速度でありながら地震動が長時間継続することによって液状化が多数発生したことが報告されている。したがって、液状化判定において地震動特性の影響を適切に評価することが求められる。

道路橋示方書では累積損傷度法を用いて地震動の繰返し特性による補正係数 C_w を算出している³⁾。これは直下型地震動のような振幅は大きいものの繰返し回数の少ない地震動に対しては液状化強度を増加させる係数である。一方で、海溝型地震に対しては $C_w=1$ として、 R_{20} と同程度であるとしている。なお、この検討に用いている液状化強度曲線は東ら⁴⁾の豊浦砂の実験結果を用いている。八代ら⁵⁾は道路橋示方書に示されている地震動よりもさらに継続時間が長くなると考えられる想定東海地震、想定東南海地震に対して、同様の検討を行っている。その結果、東海・東南海地震のような長継続時間地震動に対しては $C_w=0.9$ 程度を用いて、液状化強度を1割程度低減させる必要があることを提案している。一方、

吉田ら⁶⁾は2類の海溝型長継続時間地震動を用いて236の地盤に対する有効応力解析結果と液状化判定の比較を行い、海溝型長継続時間地震動に対しては $C_w=0.5$ を提案している。

鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計⁷⁾では、L2地震動に対してこのような C_w を定義することなく、対象地盤の液状化強度曲線を用いて設計地震動に対して累積損傷度法を用いた液状化判定を行うことで、地震動の特性を評価することとなっている。本稿では、低加速度・長継続時間地震動のような特徴的な地震動に対する累積損傷度法の適用性を検討することを目的し、有効応力解析と累積損傷度法による液状化判定の比較を行っている。特に既往の研究であり評価されていない液状化強度曲線の形状の影響や作用の妥当性について着目する。

2. 解析概要および入力地震波

有効応力解析にはマルチスプリングモデル⁸⁾とIai et al.⁹⁾の過剰間隙水圧モデルを組み込んだモデルを採用し、一次元の地盤応答解析を行った。解析対象は兵庫県南部地震で大きな液状化被害が生じた深江浜とし、三輪ら¹⁰⁾の検討を参考に表-1に示すパラ

表-1 地盤特性および解析パラメータ

	深度 (m)	γ (kN/m ³)	V_s (m/s)	ν	$h_{\max}$	G_{m0} (kN/m ²)	K_{m0} (kN/m ²)	ϕ (°)	液状化パラメータ					
									ϕ_p (°)	S_1	w_1	p_1	p_2	c_1
液状化層	まさ土層①	3.8	20.6	100	0.435	0.24	21020	154780	30	-	-	-	-	-
	まさ土層②	6.6	20.6	170	0.435	0.24	60749	447314	30	28	0.005	33.1	0.5	1.27
	まさ土層③	9.5	20.6	160	0.443	0.24	53812	451939	30	28	0.005	33.1	0.5	1.27
	まさ土層④	14.8	20.6	200	0.486	0.24	84082	2972146	30	28	0.005	26.0	0.5	1.22
	沖積粘性土	20.7	16.7	160	0.486	0.24	53812	1902173	30	-	-	-	-	-
	洪積互層	26.7	18.6	200	0.492	0.24	68041	4378001	30	-	-	-	-	-
	洪積互層	28.0	20.6	240	0.489	0.24	109558	4958575	30	-	-	-	-	-
	洪積互層	30.7	20.6	210	0.487	0.24	92700	3453182	30	-	-	-	-	-
	洪積互層	33.7	20.6	270	0.488	0.24	153239	6281284	30	-	-	-	-	-

表-2 入力加速度の特性

	最大加速度 (gal)	浦安波 との比	加速度パワー (cm ³ /s ²)	浦安波 との比
神戸波	-818.8	5.23	525130	5.10
神戸補正波	-156.6	1.00	19215	0.19
苫小牧補正波	-156.6	1.00	100260	0.97
浦安波	156.6	1.00	102964	1.00

メータを設定した。入力地震動としては、長継続時間地震動の例として2011年東北地方太平洋沖地震のK-NET浦安EW成分（以後、浦安波）と、2003年十勝沖地震におけるK-NET苫小牧EW成分の最大加速度が浦安波と等しくなるように調整して用いた（以後、苫小牧補正波）。典型的な直下型地震動としては、1995年兵庫県南部地震における神戸海洋気象台記録のNS成分を用いた（以後、神戸波）。神戸波については最大加速度が浦安波と等しくなるように調整した波についても検討した（以後、神戸補正波）。表-2にそれぞれの地震動の最大加速度と加速度パワーを示す。神戸波は最大加速度、加速度パワーともに浦安波の5倍以上である。最大加速度を調整した苫小牧補正波は、加速度パワーについても浦安波と同等となっている。図-1および2に入力波の時刻歴とフーリエ振幅スペクトルを示す。浦安波と苫小牧波を比べると、苫小牧波では3~4秒程度のやや長周期の成分が卓越しているのに対して、浦安波の卓越周期は1秒程度であったことが分かる。今回の検討では地表面での観測記録をそのまま基盤に入力しているが、それぞれの地震動を受けた場合の相対的な比較として検討を行っている。

3. 有効応力解析結果

図-3 にまさ土層②と④における過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma'_c$ 、地表面での応答加速度および変位の時刻歴を入力加速度とともに示す。まさ土層②に着目すると、浦安波と苫小牧補正波を入力した場合、加速度および加速度パワーが5倍以上の神戸波を入力した場合と同程度以上の過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma'_c$ を生じていることが分かる。また浦安波と同じ最大加速度を有していても、神戸補正波のケースでは $\Delta u/\sigma'_c = 0.5$

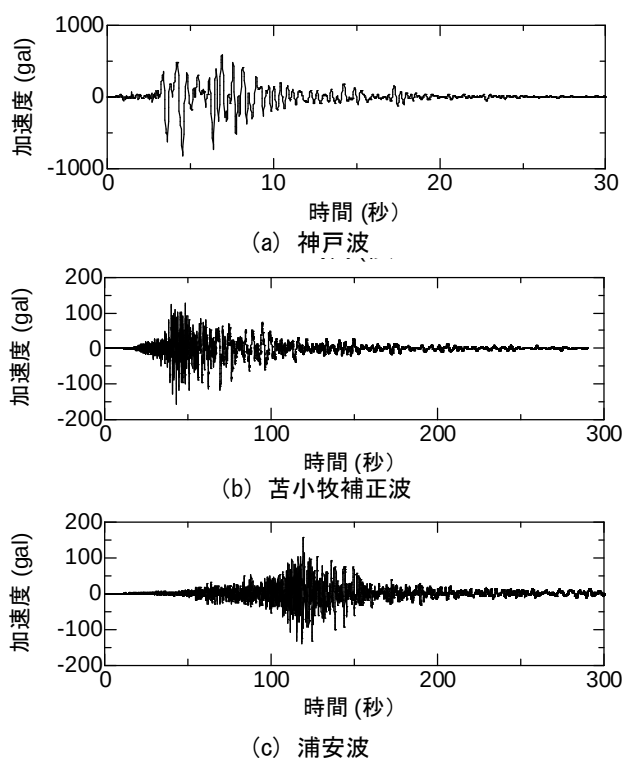


図-1 入力地震動時刻歴

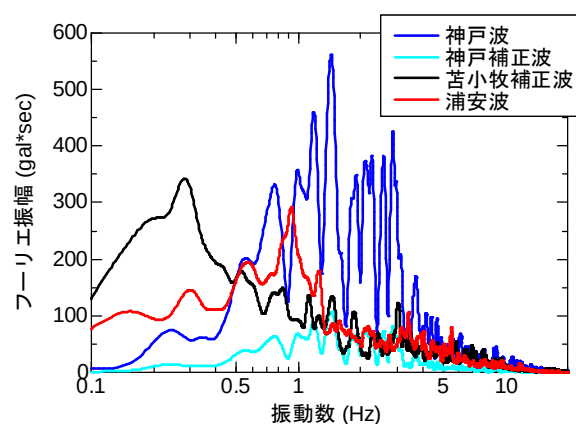
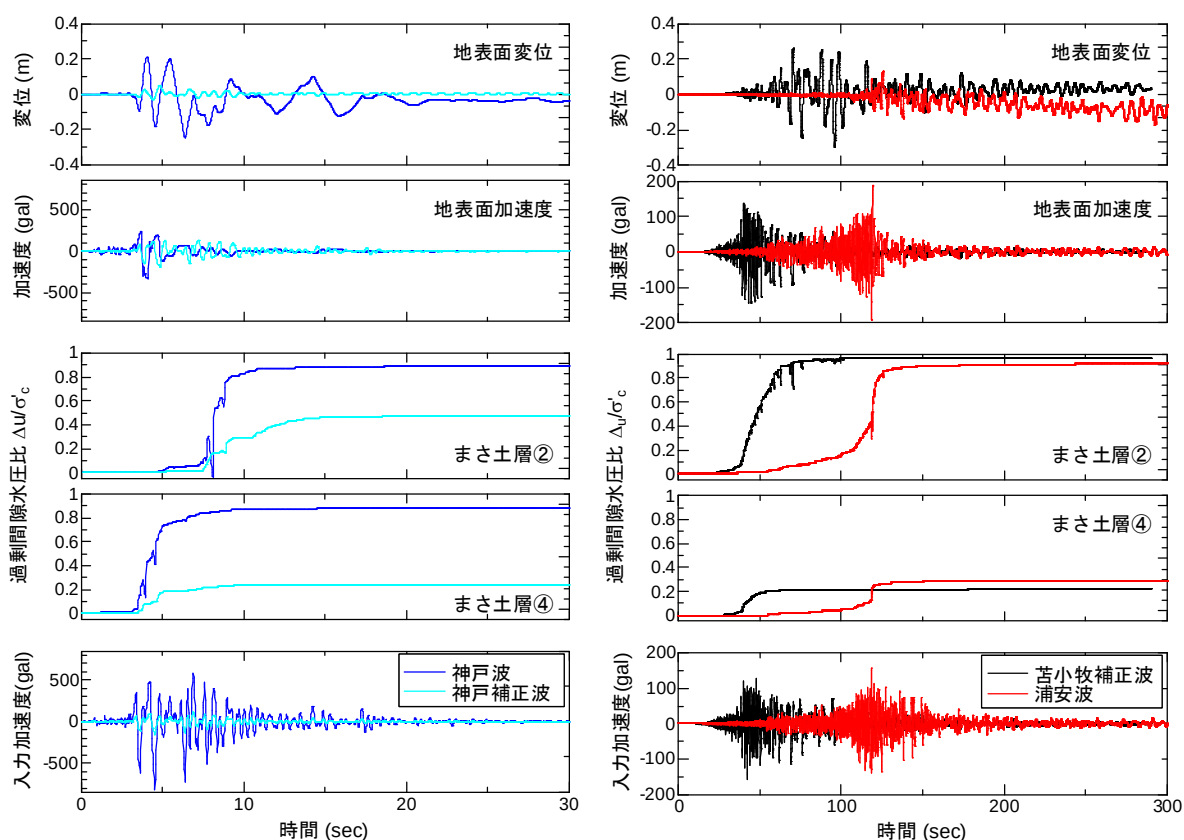


図2 入力地震動のフーリエ振幅・スペクトル

程度までしか至っていない。一方、まさ土層④においては、神戸波では $\Delta u/\sigma'_c = 0.95$ 以上まで上昇した



(a) 神戸波・神戸補正波

(b) 浦安波・苫小牧補正波

図-3 過剰間隙水圧比・地表面加速度・地表面変位の時刻歴

のに対して、浦安波および苫小牧補正波では 0.3 程度までしか上がっておらず、長継続時間地震動に対して液状化抵抗の大きい地盤であったと考えられる。この層は試験から得られた液状化強度曲線とのフィッティングによるパラメータ設定から、 c_1 が他の層と比べて 1.5 倍大きく設定してある。 c_1 は間隙水圧の上昇に及ぼす弾性せん断仕事の寄与度を調整するパラメータであり、大きな値ほど間隙水圧の上昇は小さくなる。したがって、 c_1 の大きいまさ土層④では加速度振幅の小さい領域においてあまり過剰間隙水圧が上昇しなかったと考えられる。逆に小さなひずみ振幅で過剰間隙水圧が蓄積しやすい地盤では、長継続時間地震動を受けた場合の地盤の液状化に注意が必要であると考えられる。

地表面での応答加速度および変位を見ると、いずれのケースにおいても液状化に至った後で応答加速度は小さくなり、水平変位は増幅する。特に苫小牧波では液状化後の 70～100 秒の間に大きな変位の増幅が見られる。これは液状化による剛性低下により固有周期の長周期化した地盤が、苫小牧波の後半に見られる長周期成分の地震動により増幅したものと考えられる。一方で、図-2 に示すスペクトルからも分かるように、浦安波ではそれほど長周期成分が卓越していないため、苫小牧波のような液状化後の変位の大きな増幅は見られなかった。

4. 累積損傷度法を用いた液状化判定

(1) 累積損傷度法による液状化判定

有効応力解析から、低加速度であっても継続時間が長くなることで液状化に至る可能性があることが分かった。簡易的に地震動の特性を評価できる液状化判定手法としては累積損傷度法が挙げられる。ここでは、鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計に準拠した累積損傷度法による液状化判定を行い、有効応力解析結果を比較することで、長継続時間地震動に対する累積損傷度法の適用性を評価する。

対象地盤のまさ土層の液状化強度比 R_{20} については、 $D_{50}=1.0\text{mm}$ 、 $F_c=15\%$ とし、 N 値はまさ土層②～③においてそれぞれ 10, 12, 16 として算定し、それぞれ $R_{20}=0.25, 0.24, 0.25$ を得た。

繰り返し回数 i に対する液状化強度 R_i は以下の式から算定する。ここで相対密度 Dr は上記の N 値から換算した値を用いている。

$$i) N_c \leq 20$$

$$R_i = R_{20} \left(\frac{N_c}{20} \right)^{-1.35 \exp(-3.64 + 0.037 Dr)} \quad (1)$$

$$ii) N_c > 20$$

$$R_i = R_{20} \left(\frac{N_c}{20} \right)^{-0.23} \quad (2)$$

一方で、ゼロクロッシングによる地表面波のピーク加速度から式(3)(4)より、せん断応力比波列を求める。ここで、神戸波・神戸補正波は式(3)から、苫小牧補正波・浦安波は式(4)から求めた。

$$L = (1.0 - 0.015z) \frac{a}{g} \frac{\sigma'_v}{\sigma_v} \quad (\text{直下型}) \quad (3)$$

$$L = (1.0 - 0.005z) \frac{a}{g} \frac{\sigma'_v}{\sigma_v} \quad (\text{海溝型}) \quad (4)$$

ここで L : 最大せん断応力比, z : 検討する位置(m), a : 地表面ピーク加速度 (gal), g : 重力加速度(gal), σ_v : 全上載圧 (kN/m²), σ'_v : 有効上載圧 (kN/m²) である。 L と R から対応する繰返し回数 N_c を算出し、式(5)より累積損傷度 D を算出する。

$$D = \sum \frac{1}{2N_c} \quad (5)$$

$D=1$ で液状化が発生するとし、 $D=1$ となるようにせん断応力比波列を補正し、最大せん断応力比を累積損傷度法により補正した液状化強度比 R_D とする。最後に異方応力状態を考慮して、式(6)より液状化強度比 R_L を算出する。今回は $K_0=0.5$ としている。

$$R_L = \frac{1+2K_0}{3} R_D \quad (6)$$

(2) 累積損傷度法による液状化判定結果

表-3に各入力地震動に対する液状化判定結果を示す。神戸波を入力した場合、すべての層が $F_L=1$ を下回り、 $P_L=44.0$ と激しく液状化する地盤と判定される。神戸波の振幅を低下させた神戸補正波の場合、地震動の経時特性は同じため、算定される R_L は等しいものの、作用は1/5程度であるため $F_L=1$ を下回る層はないと判定される。ここで、 R_L/R_{20} は道路橋示方書における地震動の繰返し特性による補正係数 C_w に相当する値である。道路橋示方書では $0.1 < R_L (=R_{20}) \leq 0.4$ において $C_w=3.3R_L+0.67$ を定めており、 $R_{20}=0.25$ とすると $C_w=1.495$ となる。今回行った判定においては $R_L/R_{20}=1.54 \sim 1.63$ であり、ほぼ同等の値が得られている。

一方、低加速度・長継続時間地震動である苫小牧補正波と浦安波を入力した場合は、まさ土層②③において $F_L=1$ を下回るものの、1程度である。 P_L も2程度であり、液状化の可能性の低い地盤と判定される。苫小牧補正波、浦安波を入力した場合の有効応力解析では、まさ土層②③で神戸波を入力した場合よりも大きな過剰間隙水圧が発生しており、同等以上の液状化程度であったと考えられる。したがって、有効応力解析結果がより現実に近い現象を評価しているとした場合、現在の累積損傷度法の体系では低加速度・長継続時間地震動に対する液状化の危険性を適切に評価できていないと考えられる。

表-3 累積損傷度法による液状化判定結果

神戸波						
	R_{20}	R_L	R_L/R_{20}	L	F_L	ΔP_L
まさ土層②	0.25	0.386	1.54	1.580	0.244	15.4
まさ土層③	0.24	0.382	1.59	1.557	0.245	13.3
まさ土層④	0.25	0.408	1.63	1.524	0.267	15.2
						$P_L = 44.0$
神戸補正波						
	R_{20}	R_L	R_L/R_{20}	L	F_L	ΔP_L
まさ土層②	0.25	0.386	1.54	0.302	1.277	0.000
まさ土層③	0.24	0.382	1.59	0.298	1.283	0.00
まさ土層④	0.25	0.408	1.63	0.291	1.398	0.00
						$P_L = 0.00$
苫小牧補正波						
	R_{20}	R_L	R_L/R_{20}	L	F_L	ΔP_L
まさ土層②	0.25	0.267	1.07	0.286	0.934	1.339
まさ土層③	0.24	0.261	1.09	0.273	0.957	0.762
まさ土層④	0.25	0.268	1.07	0.254	1.057	0.000
						$P_L = 2.10$
浦安波						
	R_{20}	R_L	R_L/R_{20}	L	F_L	ΔP_L
まさ土層②	0.25	0.269	1.08	0.286	0.940	1.220
まさ土層③	0.24	0.263	1.10	0.273	0.962	0.663
まさ土層④	0.25	0.270	1.08	0.254	1.063	0.000
						$P_L = 1.90$

(3) 液状化強度曲線の影響

図-4に浦安波および神戸波の加速度時刻歴、土層②のせん断応力比と液状化強度曲線をまとめた。図-4(c)に黒の実線で示した液状化強度曲線は式(1)(2)から求まる液状化強度曲線であるが、浦安波のせん断応力比のほとんどは繰返し回数20回以上の領域に入っていることが分かる。つまり、浦安波の様な低加速度・長継続時間地震動に対する液状化判定においては、式(2)から求まる多繰返し領域での液状化強度が大きく影響すると考えられる。

式(2)から求まる $N_c > 20$ の液状化強度曲線の形状は、 -0.23 という係数（以降 α とする）で決定される。そこで、 $\alpha = -0.23, -0.4, -0.6, -0.8$ として液状化強度曲線を定義して液状化判定を行い、多繰返し領域の液状化強度が液状化判定に与える影響の感度解析を行った。ここでは浦安波および神戸波を例として判定を行った。 $\alpha = -0.23, -0.4, -0.6, -0.8$ の液状化強度曲線は図-4(c)に示す通りである。例えばせん断応力比 $L=0.15$ の場合、 $\alpha = -0.23$ では $N_c=180$, $\Delta D=0.0055$ であるのに対して、 $\alpha = -0.8$ とした場合は $N_c=37.6$, $\Delta D=0.0279$ となり、損傷度 ΔD として5倍程度の差が生じることとなる。

表-4に累積損傷度法により液状化判定結果をまとめた。浦安波を入力した場合、 $\alpha = -0.23, -0.4, -0.6, -0.8$ に対して P_L でそれぞれ1.88, 9.59, 22.37, 34.50 となり、多繰返し領域の液状化強度曲線にかなり大きく影響を受けることが分かる。また、神戸波に対す

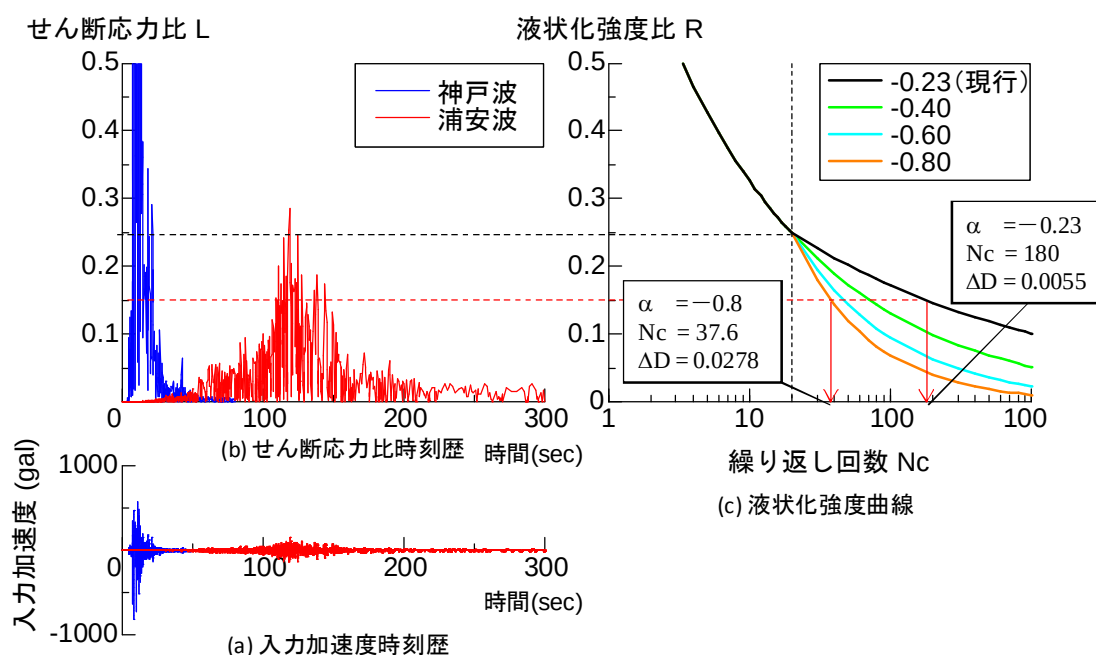


表-4 多繰返し領域の液状化強度曲線を変えた場合の累積損傷度法による液状化判定結果

係数 α	浦安波				神戸波			
	R_L	F_L	ΔP_L	P_L	R_L	F_L	ΔP_L	P_L
-0.23 (現行)	まさ土層②	0.269	0.940	1.220	0.386	0.244	15.407	
	まさ土層③	0.263	0.962	0.663	0.382	0.245	13.330	
	まさ土層④	0.270	1.063	0.000	1.88	0.407	0.267	15.243 43.98
-0.40	まさ土層②	0.228	0.797	4.145	0.372	0.236	15.584	
	まさ土層③	0.222	0.815	3.271	0.368	0.236	13.488	
	まさ土層④	0.227	0.896	2.169	9.59	0.391	0.257	15.459 44.53
-0.60	まさ土層②	0.169	0.592	8.326	0.352	0.223	15.842	
	まさ土層③	0.165	0.603	7.004	0.347	0.223	13.722	
	まさ土層④	0.168	0.661	7.042	22.37	0.368	0.241	15.782 45.35
-0.80	まさ土層②	0.113	0.395	12.338	0.325	0.205	16.196	
	まさ土層③	0.110	0.403	10.543	0.320	0.206	14.031	
	まさ土層④	0.112	0.441	11.619	34.50	0.337	0.221	16.206 46.43

る判定結果にも近づく結果となる。したがって、低加速度・長継続時間地震動に対して累積損傷度法を適用する場合、多繰返し領域の液状化強度曲線を精度良く算定する必要があると言える。一方、神戸波の場合は $P_L=44.0, 44.5, 45.4, 46.4$ と大きな違いは見られない。これは大きなせん断応力比に対する損傷度が圧倒的に大きく、小さなせん断応力比の影響が相対的に小さくなるためである。

(4) 有効応力解析との時刻歴での比較

ここまでの液状化判定に用いた液状化強度曲線は鉄道設計標準の簡易算定式から求めたものを用いてきた。ここでは、有効応力解析の要素シミュレーションから得られる液状化強度曲線を用いた液状化判定結果と有効応力解析結果を比較する。図-5(a)～(c)に今回用いた4波の加速度時刻歴、まさ土層②に

おけるせん断応力比、鉄道標準から求まる液状化強度曲線と有効応力解析で用いた液状化強度曲線をそれぞれまとめている。有効応力解析の液状化強度曲線を用いた場合の累積損傷度法による液状化判定結果を表-5に示す。苫小牧補正波、浦安波に対しては $P_L=16$ 程度と液状化する可能性の高い地盤と判定されるようになる。しかしながら、神戸波に対しては $P_L=49$ であり、両者の液状化程度に大きな差があると判定される。

図-6に有効応力解析から得られる過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma'_c$ の時刻歴と累積損傷度法から得られる累積損傷度 D の時刻歴、有効応力解析と累積損傷度法からそれぞれ得られるせん断応力比 $L(=\tau/\sigma'_c)$ の時刻歴を示す。ここで累積損傷度 D は過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma'_c$ を表す指標と考えることが出来る。低加速度の神戸補正波、苫小牧補正波、浦安波の結果を見ると、累

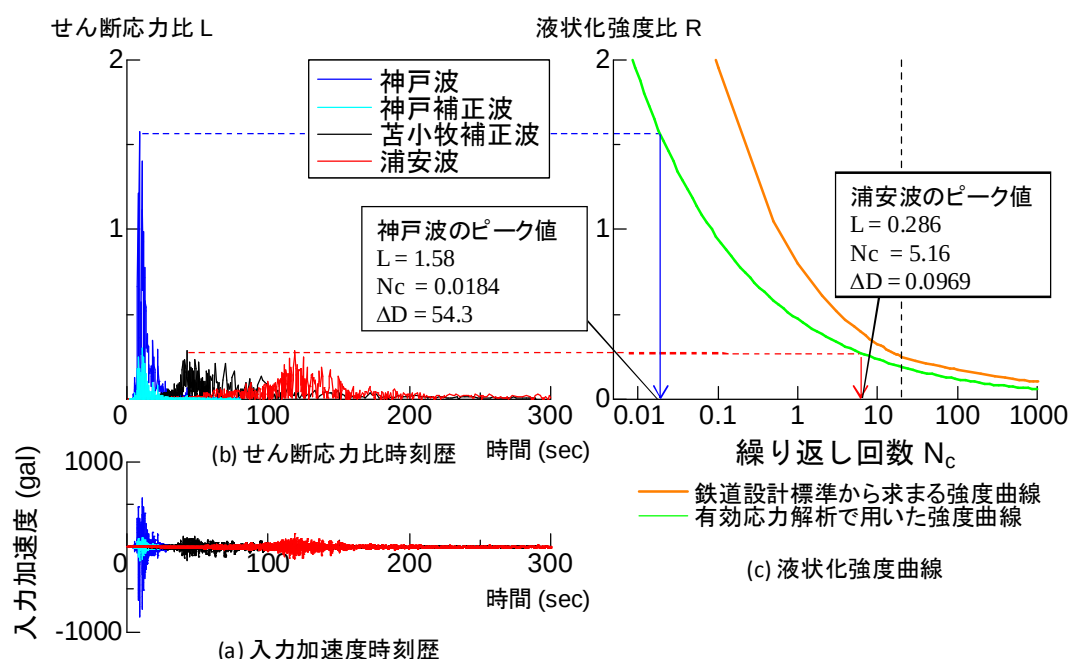


図-5 まさ土層②における各地震動に対する入力加速度・せん断応力比時刻歴と有効応力解析および累積損傷度法で用いた液状化強度比

表-5 有効応力解析に用いた液状化強度曲線を用いた累積損傷度法による液状化判定結果
神戸波

	R_{20}	R_L	R_L/R_{20}	L	F_L	ΔP_L
まさ土層②	0.19	0.261	1.37	1.580	0.165	17.0
まさ土層③	0.19	0.259	1.36	1.557	0.166	14.7
まさ土層④	0.20	0.258	1.29	1.524	0.169	17.3
	$P_L = 49.0$					

神戸補正波

	R_{20}	R_L	R_L/R_{20}	L	F_L	ΔP_L
まさ土層②	0.19	0.261	1.37	0.302	0.863	2.799
まさ土層③	0.19	0.259	1.36	0.298	0.871	2.279
まさ土層④	0.20	0.258	1.29	0.291	0.887	2.357
	$P_L = 7.434$					

苦小牧補正波

	R_{20}	R_L	R_L/R_{20}	L	F_L	ΔP_L
まさ土層②	0.19	0.191	1.01	0.286	0.667	6.794
まさ土層③	0.19	0.192	1.01	0.273	0.703	5.251
まさ土層④	0.20	0.203	1.01	0.254	0.802	4.122
	$P_L = 16.2$					

浦安波

	R_{20}	R_L	R_L/R_{20}	L	F_L	ΔP_L
まさ土層②	0.25	0.189	0.995	0.286	0.660	6.92
まさ土層③	0.24	0.190	1.000	0.273	0.697	5.36
まさ土層④	0.25	0.203	1.015	0.254	0.800	4.16
	$P_L = 16.4$					

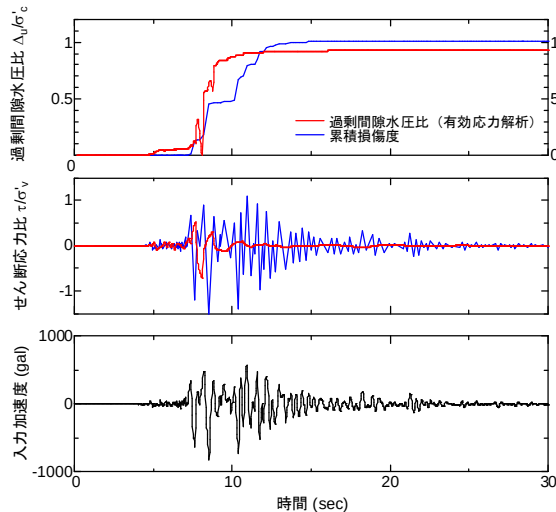
積損傷度法に用いたせん断応力比は有効応力解析結果より小さめの評価をしているものの、傾向をよく捕らえている。また、その結果算定される累積損傷度Dについても、有効応力解析の過剰間隙水圧比の上昇傾向をよく再現出来ている。

一方、神戸波を入力した場合のせん断応力比の時刻歴に着目すると、有効応力解析の場合は2波目の応答で大きな過剰過剰水圧が発生して地盤の剛性が低下するため、それ以降のせん断応力とはほとんど作用しない結果になっている。それに対して累積損傷度法では過剰間隙水圧の上昇に伴う地盤の剛性低下をそもそも考慮していないため、その傾向は追えない。しかしながら、累積損傷度法においてもせん断応力比波列の2波目で $D=13.1$ となり、有効応力解析と同様に2波目で液状化に至ることを評価出来ている。したがって、大振幅の地震動の場合、液状化に至るまでの傾向はある程度再現できるものの、液状化発生後のせん断応力比を過大に算定してしまい、結果的に大きな P_L を与える可能性があると考えられる。

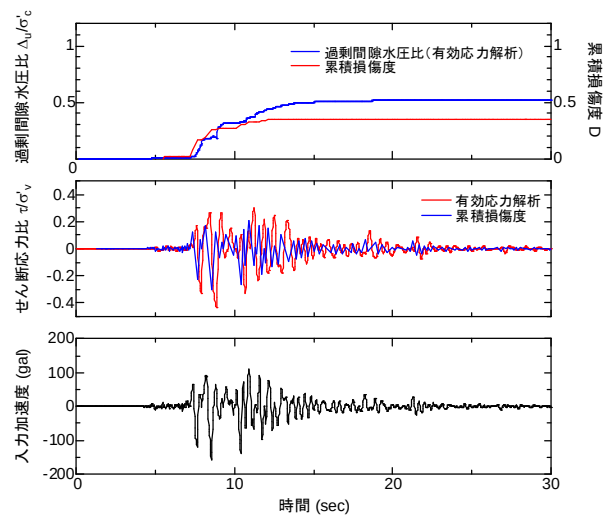
5. まとめ

本稿では、1995年兵庫県南部地震で著しい液状化が生じた深江浜地盤を対象として有効応力解析を行い、地盤の液状化に対する入力波の影響を考察した。また、累積損傷度法による液状化判定を行い、有効応力解析との比較を行うことで適用性を検討した。その結果、以下の結論を得た。

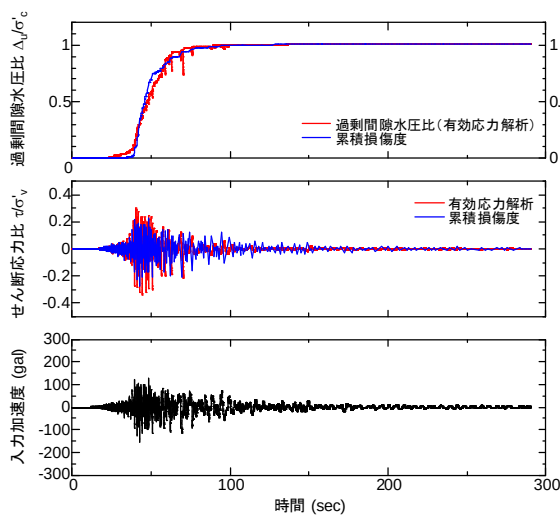
1. 有効応力解析により、低加速度・長継続時間地震動によっても、大振幅の直下型地震と同等の液状化する可能性があることを示した。
2. 累積損傷度法を用いて低加速度・長継続時間地震動に対する液状化判定を行う場合、多繰り返し部の液状化強度曲線を精度良く評価する必要がある。
3. 鉄道標準で用いられている累積損傷度法によっ



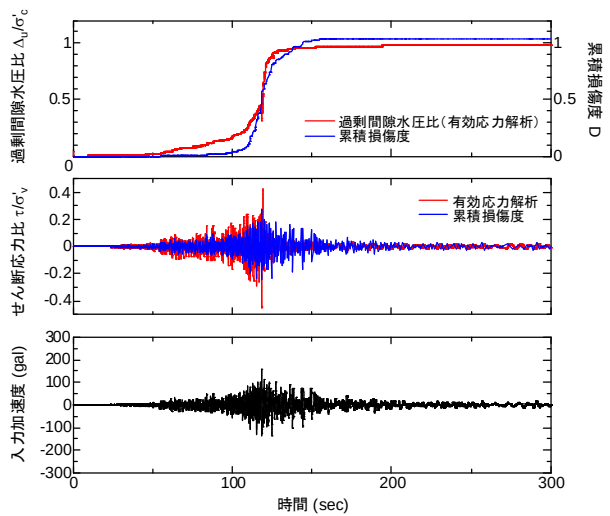
(a) 神戸波



(b) 神戸補正波



(c) 苦小牧補正波



(d) 浦安波

図-6 有効応力解析と累積損傷度法によるまさ土層②の応答値の比較

て、液状化に至るまでのせん断応力比をある程度評価でき、過剰間隙水圧の上昇傾向も累積損傷度Dの増加により概ね評価できる。ただし、過剰間隙水圧の上昇による剛性低下を考慮していないため、地震動初期に大きな過剰間隙水圧が発生するような場合は、過剰間隙水圧の上昇後のせん断応力を過大に算定してしまい、過剰に液状化する判定を与えてしまう可能性がある。

謝辞：浦安波および苦小牧補正波は防災科学技術研究所K-NETの強震記録を使用させていただきました。

参考文献

- 1) 井澤 淳, 田上和也, 室野剛隆, 地盤の液状化に及ぼす長継続時間地震動の影響, 第46回地盤工学研究発表会, 2011.
- 2) 井澤 淳, 田上和也, 室野剛隆, 地震動の長継続時間化・長周期化が地盤の液状化に及ぼす影響, 土木学会第66回年次講演会, 2011.
- 3) 東 拓生, 田村敬一, 地震動波形の繰返し特性を考慮

した液状化強度評価法, 土木技術資料39-9, pp. 50-55, 1997.

- 4) 東 拓生, 大塚久哲, 二宮嘉朗, 砂質土の相対密度を考慮した液状化強度曲線の定式化, 土木学会第49回年次学術講演会, pp.528-529, 1999.
- 5) 八代和幸, 杉戸真太, 八嶋厚, 古本吉倫, 渦岡良介, 震動継続時間の影響を考慮した液状化危険度判定法について, 第27回地震工学研究発表会, paper No.111 (CD-ROM), 2003.
- 6) 吉田 望, 大矢 陽介, 澤田 純男, 中村 晋, 海溝型長継続時間地震動に対する簡易液状化判定法の適用性, 日本地震工学会論文集, Vol. 9, No. 3, pp. 28-47, 2003.
- 7) 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, 鉄道総合技術研究所, 1999.
- 8) Towhata, I. and Ishihara, K., Modeling soil behavior under principal stress axes rotation, Proc. of 5th International Conf. on Num. Methods in Geomechanics, Vol.1, pp. 523-530, 1985.
- 9) Iai, S. et al., Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, Soils and Foundations, Vol. 32, No. 2, pp. 1-15, 1992.

- 10) 三輪 滋, 池田隆明, 大岡 弘, 1995 年兵庫県南部地震で液状化した埋立て地盤に建つ鋼管杭基礎構造物の被害原因と被害過程の検討, 日本地震工学会論文集, Vol. 4, No. 1, pp. 5-22, 2004.