

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

鉄道総合技術研究所 正会員 ○井澤 淳
 正会員 田上 和也
 正会員 室野 剛隆

1. はじめに

筆者ら¹⁾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、長継続時間地震動の影響と考えられる液状化被害が多数発生した。本稿では、2011年東北地方太平洋地震で観測された地震動や過去に観測された長継続時間地震動、典型的な直下型の地震動を受けた場合の挙動の違いについて有効応力解析を用いて比較し、地震動の継続時間や周期特性が地盤の液状化および液状化後の挙動に及ぼす影響について考察した。

2. 解析概要

有効応力解析にはマルチスプリングモデル²⁾と Iai et al.の過剰間隙水圧モデル³⁾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、三輪らの検討⁴⁾を参考に表1に示すパラメータを設定した。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。なお、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

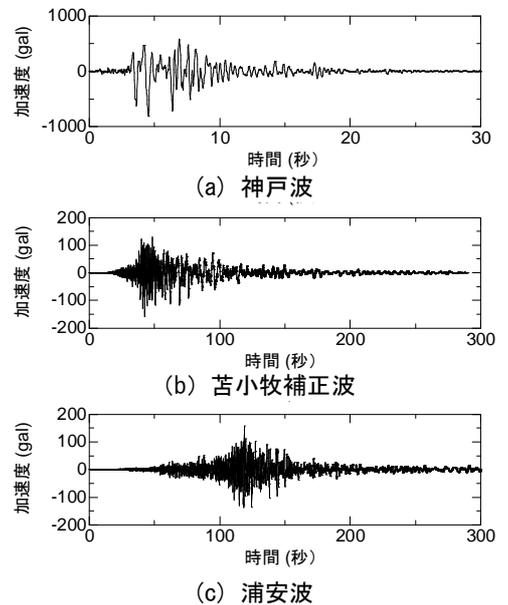


図1 入力地震動時刻歴

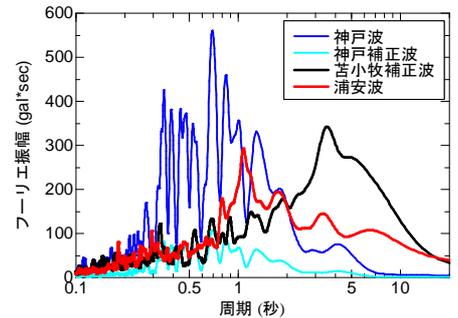


図2 入力地震動のフーリエ・スペクトル

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_{s0} (kN/m ²)	K_{s0} (kN/m ²)	ϕ (°)	液状化パラメータ					
									ϕ_p (°)	S_1	w_1	p_1	p_2	c_1
まさ土層①	3.8	20.6	100	0.435	0.24	21020	154780	30	-	-	-	-	-	-
液状化 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	1.0
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	1.0
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	1.5
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3 累積損傷度法を用いた液状化判定結果

	R_{90}	神戸波				神戸補正波				苫小牧補正波				浦安波			
		L	R_D	F_L	ΔP_L	L	R_D	F_L	ΔP_L	L	R_D	F_L	ΔP_L	L	R_D	F_L	ΔP_L
まさ土層②	0.25	1.58	0.39	0.24	15.4	0.30	0.39	1.27	0.00	0.29	0.27	0.93	1.34	0.29	0.27	0.94	1.23
まさ土層③	0.24	1.56	0.38	0.25	13.3	0.30	0.38	1.28	0.00	0.27	0.26	0.96	0.76	0.27	0.26	0.96	0.66
まさ土層④	0.25	1.53	0.41	0.27	15.2	0.29	0.41	1.40	0.00	0.25	0.27	1.06	0.00	0.25	0.27	1.06	0.00
		$P_L = 44.0$				$P_L = 0.00$				$P_L = 2.10$				$P_L = 1.90$			

※L: 最大せん断応力比 R_D : 累積損傷度を適用した液状化強度

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 ² /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

キーワード 液状化・長継続時間地震動・長周期地震動
 連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38 Tel: 042-573-7394

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。

鉄道標準⁵⁾に準じた累積損傷度法を適用し、これらの地震動に対する液状化判定結果を表3に示す。浦安波、苫小牧補正波を入力した場合は神戸波と比較してかなり高い液状化抵抗率を示し、 F_L 値は1を下回るものの P_L は5以下であり、液状化程度は低い判定となった。

3. 結果および考察

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 $\Delta u/\sigma'_c = 0.5$ 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。また、このような長継続時間地震動に対する液状化の危険性は、表3から分かるように現在の液状化判定法では適切に評価することが出来ていない。

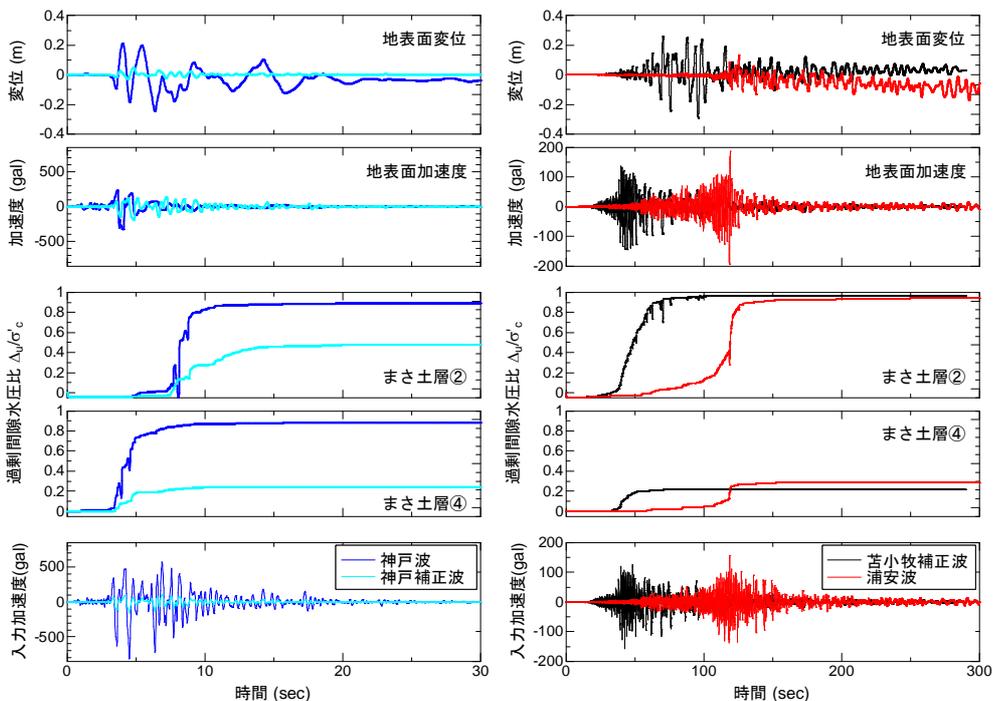
地表面での応答加速度および変位を見ると、いずれのケースにおいても液状化に至った後で応答加速度は小さくなり、水平変位は増幅する。特に苫小牧波では液状化後の70~100秒の間に大きな変位の増幅が見られる。これは液状化による剛性低下により固有周期の長周期化した地盤が、苫小牧波の後半に見られる長周期成分の地震動により増幅したものと考えられる。一方で、図2に示すスペクトルからも分かるように、浦安波ではそれほど長周期成分が卓越していないため、苫小牧波のような液状化後の変位の大きな増幅は見られなかった。

4. まとめ

本研究では、一次元有効応力解析を用いて地震動の継続時間や周期特性が地盤の液状化および液状化後の地盤挙動に与える影響を評価した。今後は地震被害調査や土質試験結果等も踏まえて、長周期・長継続時間地震動に対する液状化判定法や注意を要する地盤に関する検討を進めていく予定である。

謝辞：浦安波および苫小牧補正波は、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) 井澤ら、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) 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。3) Iai, S. et al.: Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, Soils and Foundations, Vol. 32, No. 2, pp. 1-15, 1992。4) 三輪ら、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、第4巻、第1号、pp. 5-22, 2004。5) 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。



(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