

累積損傷度を考慮した簡易液状化解析手法
—その2 簡易液状化解析手法による解析—

正会員○貫井 泰¹ 同 土方勝一郎¹
同 土田 剛¹ 同 柳下 文雄²
同 小山 桂介² 同 塩見 忠彦³

1. はじめに

その1で提案した「液状化を考慮した自由地盤の地震時簡易液状化解析手法」の妥当性を確認するために行った検討の内、①ひずみによる剛性低下のみを考慮した非線形時地震応答解析と②液状化を考慮した動的有効応力解析解析との比較検討について報告する。

2. 解析内容

表1に示すように解析手法の検討のために、線形解析、等価線形解析、時刻歴非線形解析、動的有効応力解析について比較検討した。解析プログラムには、動的有効応力解析はMuDIANを、それ以外はSHAKEを用いた。線形解析は全く同じ解を得、等価線形解析についてもかなり近い解を得た。ここでは、Ramberg-Osgood (R-O) モデルによる非線形時地震応答解析と、Densification モデルを用いた有効応力解析との比較結果について報告する。

表1 解析ケース

解析番号	比較対象	検討パラメータ	解析	地震波	水圧比	減衰	累積限界
L-R1	線形解析 (SHAKE)	なし	線形	臨海	---	比例	0.999
E-R2	等価線形解析 (SHAKE)	なし	ひずみ	臨海	---	比例	0.999
A-R1	液状化解析 (MuDIAN)	標準モデル	累積	臨海	Seed	比例	0.999
A-R2		減衰項計算法	累積	臨海	Seed	一定	0.999
A-R3		過剰間隙水圧比計算法	累積	臨海	比例	0.999	0.999
A-R4		累積損傷度の最大値	累積	臨海	Seed	比例	0.99
A-R5							0.9999
A-E1				EL			
A-T1	地震動の違い		Taft	Seed	比例	0.999	
A-K1			神戸				

※・解析の「ひずみ」は等価線形解析、「累積」は累積損傷度を考慮した等価線形解析を示す。
・地震波の「臨海」は東京都臨海部レベル2相当模擬地震波、「EL」はEl Centro 1940年NS成分、「Taft」はTaft 1952年EW成分、「神戸」は兵庫県南部地震の神戸大学で観測された地震波を示す。
・減衰の「比例」は γ - β 曲線の h と低下した剛性で減衰マトリクスを作り直す方法である。
・累積限界の値は、設定した累積損傷度の上限値を示す。

3. 解析モデル

(1) 地盤の材料物性

検討に用いた地盤モデルは深さ約21.4m迄が液状化の可能性のある実地盤で、解析には50m迄のモデル化を行った。地盤定数を表1に示す。標準貫入試験は、-26.3mまでであり、それ以深-40mまでは、-26.3mと

同じ物性としている。凍結サンプリングによる-4m, -6m, -9m, -12m, -15mにおける液状化試験、動的変形試験の結果を用いた。図1に G/G_0 - γ 曲線および液状化強度曲線を示す。また、R-OモデルおよびDensificationモデルのパラメータを表3に示す。なお、-21.4m以深は線形材料とし $h=2\%$ とした。

表1 地盤材料定数

層	深さ (m)	V_s (m/s)	γ (kN/m ³)	ポアソン比 ν	粘着力 (kPa)	摩擦角 (deg)	R_{20} ($\sigma'_v/2\sigma'_c$)	せん断剛性 C_p	$G-\gamma$ 曲線	液状化強度曲線
細砂	-2.3	122.5	17.26	0.3	0.01	36.0		26362	No.1	—
	-4.4	138.5	17.95	0.3	0.00	36.0	0.1650	35084	No.1	FS1-4
	-6.6	138.5	17.95	0.3	0.00	36.0	0.1650	35084	No.1	FS1-4
	-9.7	218.3	18.34	0.3	0.00	40.4	0.2900	89082	No.2	FS1-6
	-12.5	231.7	18.34	0.3	0.00	38.2	0.3000	100352	No.2	FS1-9
	-14.65	315.0	18.83	0.3	0.00	35.0	0.2500	190414	No.2	FS1-12
中粒砂	-18.6	251.3	18.44	0.3	0.00	33.0	0.2450	118678	No.3	FS1-15
	-21.4	239.0	17.55	0.3	0.00	37.8	0.3156	102214	No.3	—
粘土	-24.5	192.6	17.65	0.3	0.00	35.3	0.4545	66738	—	—
	-27.6	192.6	17.65	0.3	0.00	35.3	0.4545	66738	—	—
	-30.7	192.6	17.65	0.3	0.00	35.3	0.4545	66738	—	—
	-33.8	192.6	17.65	0.3	0.00	35.3	0.4545	66738	—	—
	-36.9	192.6	17.65	0.3	0.00	35.3	0.4545	66738	—	—
	-40.0	192.6	17.65	0.3	0.00	35.3	0.4545	66738	—	—
同結粘性土	-42.5	270.0	17.65	0.3				131124	—	—
	-45.0	270.0	17.65	0.3				131124	—	—
固結粘性土	-48.0	380.0	17.65	0.3				259700	—	—
	-50.0	350.0	18.63	0.3				232554	—	—

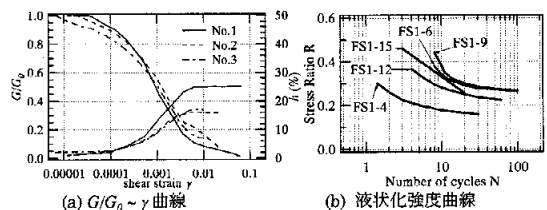


図1 G/G_0 - γ 曲線および液状化強度曲線

表3 R-OモデルおよびDensificationモデルのパラメータ

深さ (m)	R-O モデル		Densification モデル		
	γ_{50}	h_{max}	γ	A	B
0.0~2.3	0.0009	0.25	—	—	—
-2.3~6.6			1.0	0.0450	10.0
-6.6~9.7			1.0	0.0140	1.0
-9.7~12.5	0.0012	0.16	1.0	0.0115	1.0
-12.5~14.65			1.0	0.0170	1.0
-14.65~18.6	0.0010	0.17	1.0	0.0170	1.0
-18.6~21.4			0.1	0.0120	1.0

A response analysis procedure for liquefaction using an accumulated damage parameter
- Part 2 Numerical verification

NUKUI Yasushi et al

4. 解析結果

最初に R-O モデルによる解析結果の比較を示す。図 2 に表層と G.L.-14.65m での時刻歴加速度応答を示す。波形はそれぞれの振幅が良く対応しているが、R-O モデルでは高振動成分があり、ピーク値に差が生じている。これが図 3 に示す最大応答加速度分布にも反映されており、G.L.-10m~25m では大きく、それ以外では小さくなっているが、全体としては良く一致している。

次に Densification モデルによる解析結果との比較を示す。図 4 に液状化率の比較を示す。本解析法は半波毎に液状化率を計算するので階段状になっているが、全体的には有効応力解析結果と良い対応をしている。これによると表層直下で液状化率 0.7 となり剛性が大きく下がっている事が予想される。図 5 の時刻歴加速度応答はこれを反映して 10 秒近くで応答が小さくなると共に長周期化している。中間層 (G.L.-14.65m) は、15 秒を過ぎて液状化していることが図 4 の液状化率および図 5 の加速度応答等からわかる。この結果は有効応力解析結果と良く一致している。最大応答加速度およびせん断応力の最大値は、液状化を考慮しない非線形解析結果における結果比較の場合より差がやや大きい、全体にはよい対応をしている。

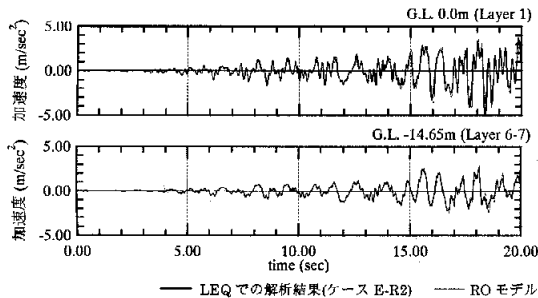


図 5 応答加速度時刻歴

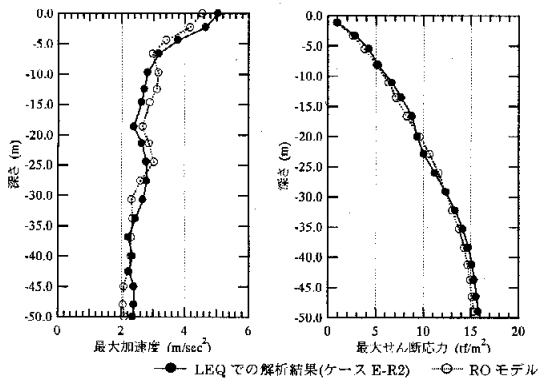


図 4 最大応答加速度および最大せん断応力分布図

5. まとめ

自由地盤の地震応答解析において、液状化による地盤剛性の低下量を累積損傷度より求める方法を提案し、数値解析によるパラメータスタディを行い、提案方法の妥当性・適用性を確認した。

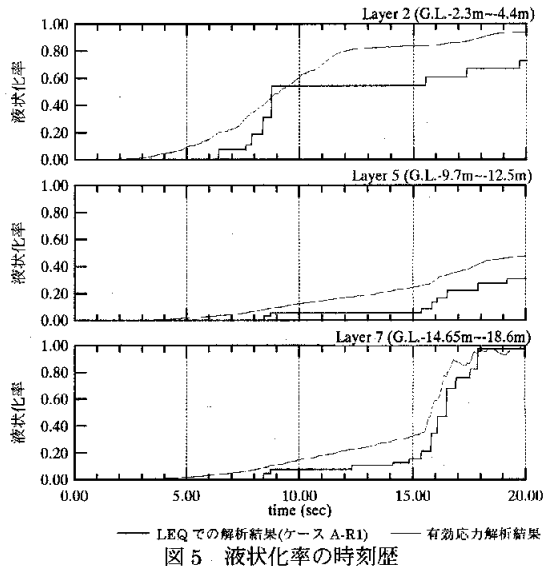


図 5 液状化率の時刻歴

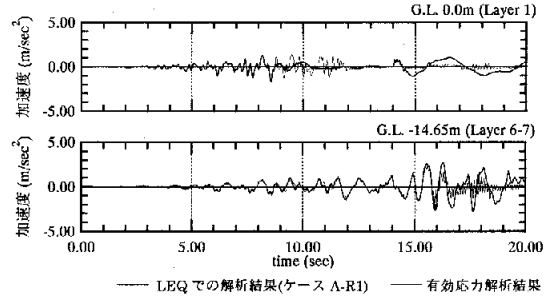


図 6 応答加速度時刻歴

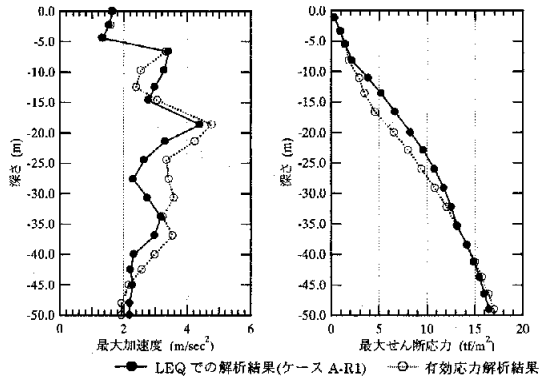


図 7 最大応答加速度および最大せん断応力分布図

*1 東京電力 (株)
*2 東電設計 (株)
*3 (株) 竹中工務店

Tokyo Electric Power Company
Tokyo Electric Power Services Co. Ltd.
Takenaka Corporation