

鉱さい集積場における累積損傷度理論を用いた液状化の評価

大成建設(株) 正会員○広重敬嗣 正会員 立石 章 正会員 千野和彦

1. 研究の背景と目的

鉱さい集積場（以下、集積場）の地震時安定対策の設計においては、鉱さい集積物の液状化の評価が重要である。原・広重¹⁾は、沢地形の3次元的な堆積形状を成す集積場に対して2次元・3次元地震応答解析を実施し、地震時せん断応力の時刻歴最大値 $\tau_{d,max}$ を用いた評価法により液状化安全率 F_L の分布傾向について検討した。従来のレベル2地震動に対する集積場のすべり変形解析では、 $\tau_{d,max}$ による F_L を時刻に関わらず一定値として与えている。一方で、安田・安達²⁾により、 F_L の変化を時々刻々と評価する累積損傷度理論を用いた評価法が提案されており、2次元地震応答解析を対象に適用されている。本研究では、安田・安達²⁾の提案法を集積場の2次元・3次元地震応答解析に適用し、集積場各部位での F_L について検討を行った。

2. 解析条件

地震応答解析の条件は、原・広重¹⁾による解析と同様である。解析モデルおよび基盤地震動を図1、図2に示す。

3. 液状化安全率の算定手法

図1に示す各検討対象要素について、岩崎・龍岡³⁾を参考に、(1)式により液状化安全率 F_L を算出した。

$$F_L = \frac{R}{L} = \frac{C_1 \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot C_5 \cdot R_L \cdot C'}{C \cdot \tau_{dh} / \sigma'_{v0}} \quad \dots (1)$$

ここに、 R_L は繰返し非排水三軸試験結果の $R_L \sim N_L$ 関係より得られる液状化強度比であり、図3のように設定した。補正係数 $C_1 \sim C_5$ および C' は、 R_L を原位置相当の液状化強度比 R に補正する係数である。 C_1 は初期自重解析による平均有効応力と鉛直有効応力の比より要素毎に設定した

($C_1 = \sigma'_{m0} / \sigma'_{v0}$)。また、 C_3 および C_4 は試料の乱れと密度化に対する補正 ($C_3 \cdot C_4 \cong 1.0$)、 C_5 は地震動の多方向性に対する補正 ($C_5 = 0.9$)、 C' は集積場技術指針⁴⁾に示される割増係数 ($C' = 1.2$) である。 $C (= 1/C_2)$ は、不規則な地震時せん断応力波 τ_{dh} を一定振幅波に換算する補正係数で、本研究では(2)式に示す鉄道構造物等設計標準⁵⁾の方法に従い、 τ_{dh} の時刻歴を用いて要素毎に算定した。

$$C = 1/C_2 = R_{L20} / R_D \quad \dots (2)$$

ここに、 R_{L20} は繰返し回数 $N_L = 20$ に対する液状化強度比、 R_D は時刻歴による地震時せん断応力比 $L (= \tau_{dh} / \sigma'_{v0})$ の半波ピーク波列と $R_L \sim N_L$ 関係より算定される累積損傷度 D が1.0となるように半波ピーク波列を補正した際の最大のピーク値である。

また、本研究では、 τ_{dh} には加振方向のせん断応力の地震時増分を用いることとし、2次元解析には $\tau_{d,xy}$ 、3次元解析には $\tau_{d,xx}$ の時刻歴応答を用いる。また、時刻歴による F_L の評価方法については、安田・安達²⁾の提案法を用いた。

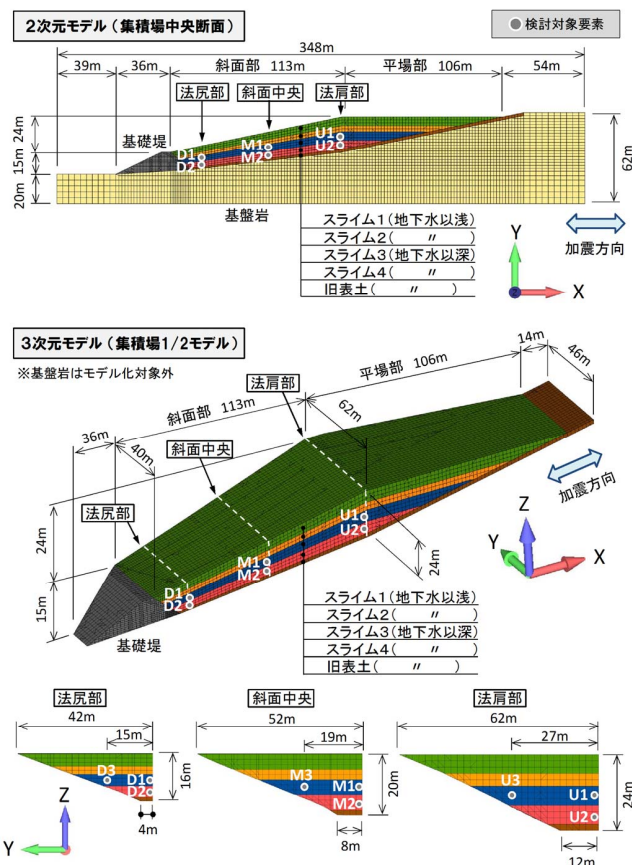


図1 解析モデル

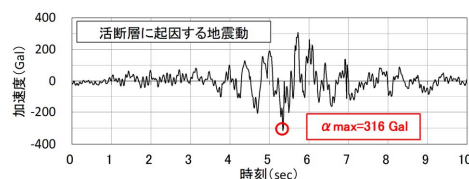


図2 基盤地震動(2E)

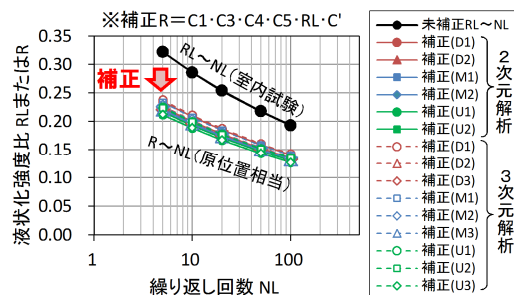
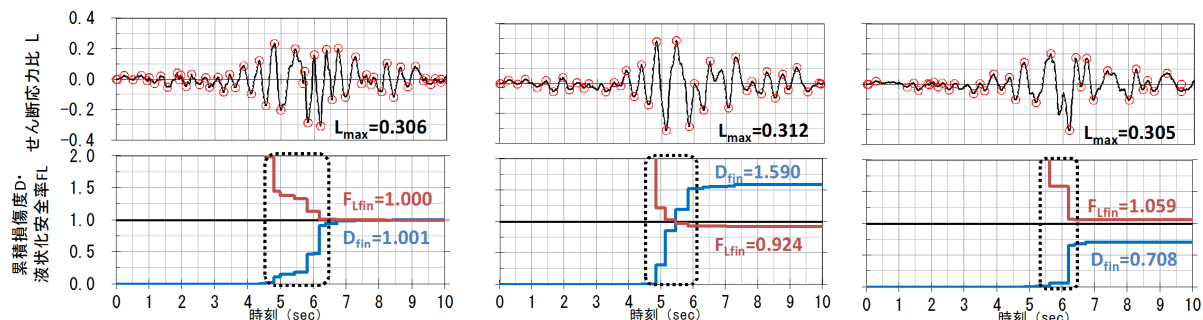


図3 液状化強度曲線

キーワード 鉱さい集積場, 3次元地震応答解析, 液状化

連絡先

〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1 大成建設(株)土木設計部 TEL 03-5381-5418

図4 3次元モデルによる L および $D \cdot F_L$ の時刻歴変動 (左から要素 D1・M1・U1)

4. 検討結果

3次元地震応答解析における要素 D1, M1, U1 の L , D , F_L の時刻歴を図4に示す. 図4より, いずれの部位においても D および F_L は主に5~6秒の主要動付近(.....)においてのみ変化し, その他の時間に作用する L は液状化への寄与が小さい.

次に, 各要素における C_1 および C , 半波せん断応力比波の最大値 L_{max} , 液状化安全率の時刻歴最終値 $F_{L,fin}$ の一覧を表1に示す. ただし, 表1括弧付きの値は原・広重¹⁾と同様に, $C(=1/C_2)$ を全要素一律に0.617(C_2 を1/0.55と1/0.70の平均より1.62として設定)とし, F_L は水平せん断応力時刻歴最大値 $\tau_{dh,max}$ より求めたものである.

表1より, C_1 () は, いずれの部位でも「法尻部>斜面中央>法肩部」となっている. これは, 基礎堤に変形を拘束された法尻部では集積物自重により水平方向の初期応力成分が大きくなるためである. 次に, 応答の震動特性を表す C (.....) は, 相対的に大きいほど振動型に, 小さいほど衝撃型の震動特性に近いことを示すが, 「法尻部および法肩部<斜面中央」となっており, 集積場の各部位で震動特性にも違いが生じていることが分かる. さらに, 2次元モデルと3次元モデル中央断面对応している要素の L_{max} () を比較すると, 全ての部位で「2次元解析>3次元解析」となっている. これは, 図1に示すように, 3次元モデルでは横断方向(YZ面)に集積物が逆台形形状をしており, 中央断面における加振方向(X方向)の震動変位に対する拘束度が2次元モデルよりも大きいためであると考えられる.

上記の要因により, 2次元・3次元モデルの対応要素の $F_{L,fin}$ の比較(.....)では「2次元解析<3次元解析」であり, 同一解析モデルにおける部位毎の $F_{L,fin}$ の比較では「法尻部および法肩部>斜面中央」となっている. また, 本研究による $F_{L,fin}$ は, 補正係数 C を全要素一律0.625で設定した F_L の結果(表1括弧付きの値)とは異なる分布傾向が得られた. これは, 本研究においては累積損傷度理論に基づく液状化評価方法を適用したことで, 集積場の各部位における震動特性の違いが考慮された液状化安全率が求められているためである.

5. まとめ

鉦さい集積場の2次元・3次元地震応答解析に基づき累積損傷度理論による液状化の評価を実施することで, 集積場の各部位における応答の震動特性が液状化安全率 F_L の分布傾向に影響を及ぼすことが明らかとなった. 今後は, 3次元的な応力成分を考慮した累積損傷度理論に基づく液状化評価手法について, 検討を行う予定である.

参考文献

- 1) 原・広重ら: 鉦さい堆積場のレベル2地震動に対する耐震設計に関する研究(その3), 土木学会第70回年次学術講演会, 2015.
- 2) 榎地盤ソフト工房: 液状化安全率計算システム EXCESS/Win マニュアル, pp26-37, 2012年7月.
- 3) 岩崎・龍岡ら: 砂質地盤の地震時流動化の簡易判定方法と適用例, 第5回地震工学シンポジウム講演集, pp641-648, 1978.
- 4) 経済産業省: 鉦業上使用する工作物等の技術基準を定める省令の技術指針, pp113-120, 平成24年11月30日.
- 5) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・解説 耐震設計, pp250-253, 平成24年12月.

表1 検討結果一覧

	要素	2次元モデル			3次元モデル		
		法尻部	斜面中央	法肩部	法尻部	斜面中央	法肩部
		D1	M1	U1	D1	M1	U1
スライム3 中央断面	C_1	0.675	0.638	0.609	0.684	0.671	0.647
	C	0.596	0.632	0.603	0.614	0.638	0.548
	L_{max}	0.334	0.317	0.295	0.306	0.312	0.305
	$F_{L,fin}$ (F_L)	0.929 (0.897)	0.874 (0.895)	0.939 (0.917)	1.000 (0.994)	0.924 (0.955)	1.059 (0.942)
	要素				D3	M3	U3
側方部	C_1				0.636	0.636	0.611
	C				0.618	0.670	0.634
	L_{max}				0.266	0.271	0.250
	$F_{L,fin}$ (F_L)				1.061 (1.064)	0.963 (1.044)	1.055 (1.085)
スライム4 中央断面	要素	D2	M2	U2	D2	M2	U2
	C_1	0.648	0.633	0.624	0.654	0.650	0.644
	C	0.597	0.647	0.566	0.613	0.660	0.556
	L_{max}	0.312	0.303	0.310	0.271	0.278	0.295
	$F_{L,fin}$ (F_L)	0.954 (0.922)	0.887 (0.930)	0.974 (0.893)	1.078 (1.073)	0.973 (1.040)	1.075 (0.970)