

弾塑性 FEM の結果に及ぼす入力パラメータの バラツキの影響と結果の信頼性

高野 令男¹・岡村 未対²・松尾 修³

1 正会員 工修 小野田ケミコ株式会社 第一営業本部 (〒111-8637 東京都台東区柳橋 2-17-4)

2 正会員 工博 独立行政法人 土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1 番地 6)

3 正会員 工修 国土交通省 国土技術政策総合研究所 (〒305-0804 茨城県つくば市旭 1 番地)

近年、動的有限要素解析法が実務にも取り入れられてきた。このような解析法を実務設計に用いる場合、結果の信頼性評価を行って適切な安全率あるいは部分係数を決める必要がある。結果の信頼性に影響を及ぼす要因として、解析手法自体の不確実さ、入力パラメータ（土質定数等）の不確実さが上げられる。そこで本研究では、動的有限要素解析コード（LIQCA）を用い、液状化地盤上の盛土の地震時変形解析を行い、入力パラメータのバラツキが沈下量に及ぼす影響を調べた。また、解析結果に対して信頼性の評価を試みた。

Key Words : elasto-plastic, finite element method, embankment, liquefaction, deformation

1. はじめに

近年、土木分野では許容応力設計法から限界状態設計法への移行が進められている。地盤工学の分野も例外ではなく、構造物の限界状態や地震時変形予測等の動的有限要素解析法の開発が進められており、一部実務にも採り入れられてきた。このような解析法を実務設計に用いる場合、結果の信頼性評価を行って適切な安全率あるいは部分係数を決める必要がある。その結果の信頼性に影響を及ぼす要因として、解析手法自体の不確実さ、入力パラメータ（土質定数等）の不確実さが挙げられる。

本報告では、Oka¹⁾の弾塑性モデルを用いた弾塑性 FEM (LIQCA) を用い、液状化地盤上の盛土の地震時変形解析を行った。本解析では入力パラメータの不確実さが結果に及ぼす影響に着目し、2種類の解析を行った。すなわち、①液状化強度曲線を一定にするという制約条件の下で入力パラメータを変えて解析を行い、この入力パラメータの解析結果に及ぼす感度を調べる。②同一地盤から採取した試料の液状化強度試験結果のバラツキを既往の資料で調査し、そのバラツキが解析結果に及ぼす結果を検討する。また、これらの解析結果から、解析結果に対する信頼性設計の可能性を検討する。

2. パラメータ感度分析

LIQCA で用いる構成式では、16 個のパラメータを決める必要がある。詳細な土質試験によって決まるパラメータは 9 個、試験から直接は決まらないパラメータ（フィッティングパラメータ）は 7 個あり（表-1 参照）、後者の 7 個のパラメータは液状化強度曲線にフィッティングさせることによって決められることが多いが、同じ液状化強度曲線にフィットするパラメータセットは複数個存在する。

FEM を用いた解析では、個々の入力パラメータの値そのものが重要ではなく、パラメータセットによって決まる応力ひずみ関係が重要であり、これが解析結果の支配的な要因であろう。そこで、このことを確認するために一連の解析を行った。ここでは、同じ応力ひずみ挙動を表現できる異なるパラメータセットを探すのが極めて困難であることから、液状化強度 (R_{L20}) と液状化後のひずみの進展程度に着目し、これら R_{L20} とひずみの伸びが同じとなる異なるパラメータセットを設定し、解析を行った。これらのパラメータの具体的な設定方法は次の通りである。基本となる一つのパラメータセットを作り、①土質試験より決まるパラメータのうち一つを変動させる（変動方法は後述する）。②フィッティングパラメータの値を試行錯誤によって調節しながら要素シミュレーションを行い、 R_{L20} とひずみの伸びが基本パラメータセッ

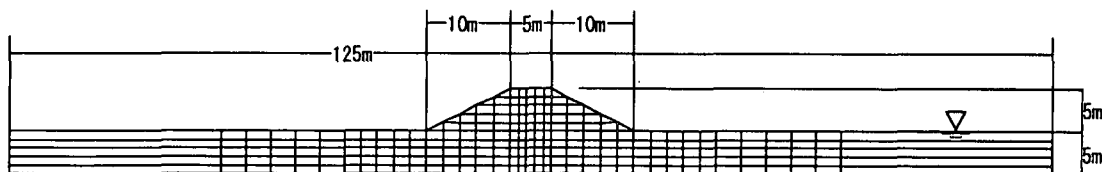


図-1 解析モデル

トと同じになるようにする。このような操作を土質試験より決まるパラメータのうち4個のパラメータ (e_0 , λ , G_0 , M_f) について行い、得られたパラメータセットを用いて解析を行った。なお、ひずみの伸び方については、異なる破壊基準 (DA=1%, 5%, 10%) に対する液状化強度曲線をあわせることとした。

2. 1 解析モデルと解析条件

(1) 解析モデル

解析モデルを図-1 に示す。モデルは深さ 5m、幅 75m の液状化層と、高さ 5m、天端幅 5m、のり面勾配 1:2 の盛土で構成されている。解析モデル両端には、拘束条件による反射波の影響を避けるため、25m の幅広要素を設けている。モデル側面は鉛直のみ自由とし、底面は全固定で、排水境界は地表面のみ設けている。基本パラメータと液状化強度曲線をそれぞれ図-2 と表-1 に示す。この基本パラメータは、兵庫県南部地震で被害の大きかった

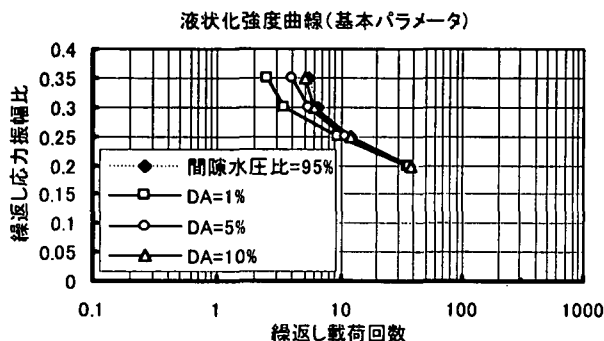


図-2 液状化強度曲線 (基本パラメータ)

表-1 基本パラメータ

パラメータ名	液状化層	盛土	
密度 ρ (g/m ³)	1.900	1.742	土質試験による
透水係数 k (m/sec)	5.20×10^{-5}	1.70×10^{-5}	土質試験による
初期間隙比 e_0	0.61	0.86	土質試験による
圧縮指数 λ	0.015	0.025	土質試験による
膨潤指数 κ	0.0015	0.0025	土質試験による
初期せん断係数比 G_0/σ'_{mo}	882.6	1346	土質試験による
過圧密比 OCR	1	1	土質試験による
変相応力比 M_m	1.09	0.909	土質試験による
破壊応力比 M_f	1.158	1.511	土質試験による
硬化パラメータ B_0	4000	2500	ラフメイティング法による
" B_1	80	-	
" C_f	0	0	
基準ひずみ(塑性剛性) γ^P	0.0015	0.01	
基準ひずみ(弾性剛性) γ^E	0.0075	0.015	
ダイレイタンシー係数 D_0	1	1	
" n	4	-	

淀川左岸堤防での地質調査等を参考に要素シミュレーションを行い設定した ($R_{L20}=0.22$ 程度)。盛土のパラメータは建設省土木研究所での遠心模型実験²⁾のものを参考にし、液状化層と同様に設定した。

(2) 解析条件とパラメータ変動方法

解析に用いた入力波は図-3 に示す兵庫県南部地震時の大淀での観測波形の前半部分 (最大入力加速度=約 220gal) を用いた。解析での時間増分は 0.001 秒、解析時間は 20 秒とした。

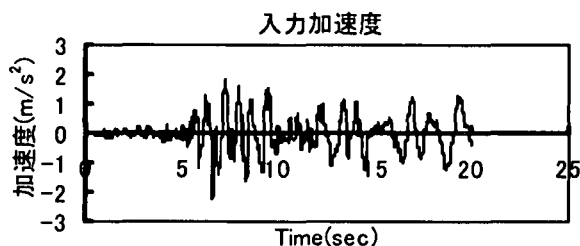


図-3 入力波形

土質試験によって決まるパラメータのうち、初期間隙比 e_0 、初期せん断剛性 G_0 、圧縮指数 λ 、破壊角 ϕ_f の4つを変動させた。この時、膨潤指数 $\kappa=\lambda/10$ 、変相角 $\phi_m=0.94\phi_f$ とした。各パラメータの変動幅は $\pm 1\sigma$ とした (σ は標準偏差, G_0 は $G_0=\rho V_s^2$ から V_s を変動させた)。標準偏差は既往の資料³⁾等を参考に決定し、表-2 のように変動値を設定した。圧縮指数 λ については既往の資料が見つからなかったため、ここでは基本パラメータの3倍、1/3倍とした。

図-4 に全ケースで設定した液状化強度曲線 (DA=5%) を示す。この図から分かるようにパラメータを変動させても DA=1%, 10%, 過剰間隙水圧比=95% に対する液状化強度曲線ができるだけ同一になるようにパラメータを設定した。

表-2 各パラメータの変動値

変動項目	最大値	最小値
初期間隙比 e_0	0.671	0.549
初期せん断剛性比 G_0/σ'_{mo}	1235.5	587.1
破壊角 ϕ_f	38.5°	31.5°
圧縮指数 λ	0.045	0.005

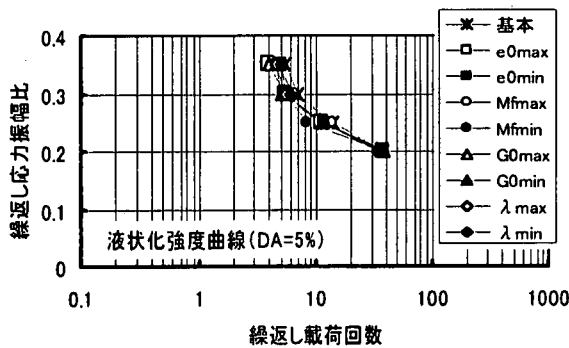


図-4 液状化強度曲線

2. 2解析結果

図-5は各ケースの解析結果の盛土天端沈下量について比較したものである。この結果をみると、土質試験から求まる各パラメータを変動させても、液状化強度とひずみの伸び方をあわせれば、LIQCAを用いたシミュレーションによる盛土天端沈下量はほぼ一定の値となることが確認できた。

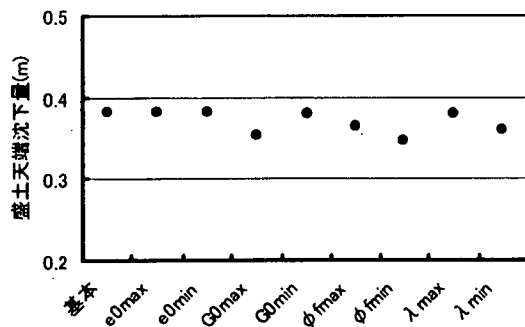


図-5 盛土天端沈下量の比較

3. 液状化強度曲線の感度分析

前節で、解析手法 LIQCA では個々のパラメータに異なる値を用いても、液状化強度曲線とひずみの伸びを合わせることでほぼ一定の盛土沈下量が得られた。この事は、液状化強度曲線があつていれば個々のパラメータの精度は重要ではなく、液状化強度曲線（試験）の精度が重要であることを示している。そこで、液状化強度曲線自体のバラツキを調べ、解析結果に及ぼす影響を調べる。

3. 1 解析手法と解析条件

液状化強度のバラツキを、釧路川堤防・淀川堤防・後戻別川堤防地盤の砂質土に対して行った液状化強度試験データ 26 セットから求めた。各セットで DA=5% の両対数グラフでの近似直線の傾きと 20 回強度 R_{L20} を以下のように求めた。図-6 の模式図に示すように最大の近似直線と最小の近似直線とをとり、傾き、 R_{L20} とそれぞれの平均値求め、一つのセット内での傾き・ R_{L20} の偏差/平均値を求めた。これを 26 セットの試験結果に対して行い、傾き・ R_{L20} それぞれの偏差/平均値の度数分布より変動

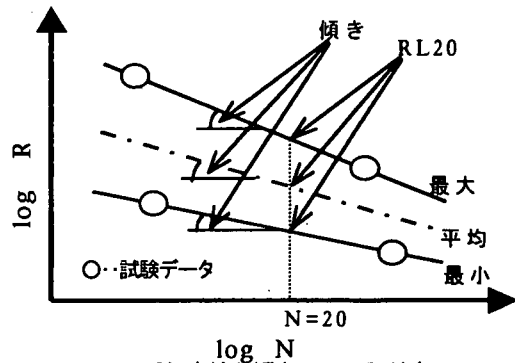


図-6 近似直線と傾き R_{L20} の取り方

係数を求めると、傾きの変動係数=0.241、 R_{L20} の変動係数=0.088 となった。この値を用いて液状化強度曲線を $\pm 1\sigma$ 変動させ、動的解析を行った。ここで用いるパラメータは、前節での基本パラメータ（以降パラメータ 1）と、土の力学的挙動の違いによる結果を比較するために DA=5% の液状化強度曲線とはほぼ同一でひずみの伸びが緩やかなパラメータ（以降パラメータ 2、図-7 参照）の 2 種類を基本とし、解析を行った。また、解析モデルと入力地震動は前節と同じものを使用した。

液状化試験の結果には、原地盤の不均一性や試料採取

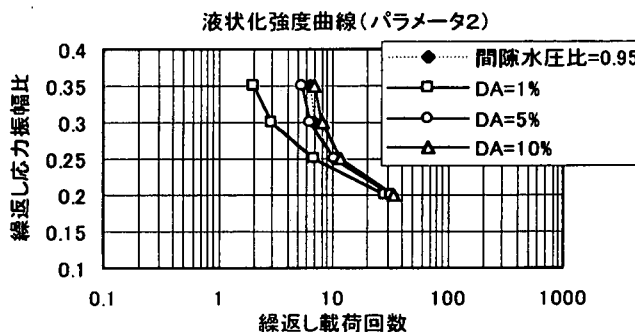


図-7 液状化強度曲線（パラメータ 2）

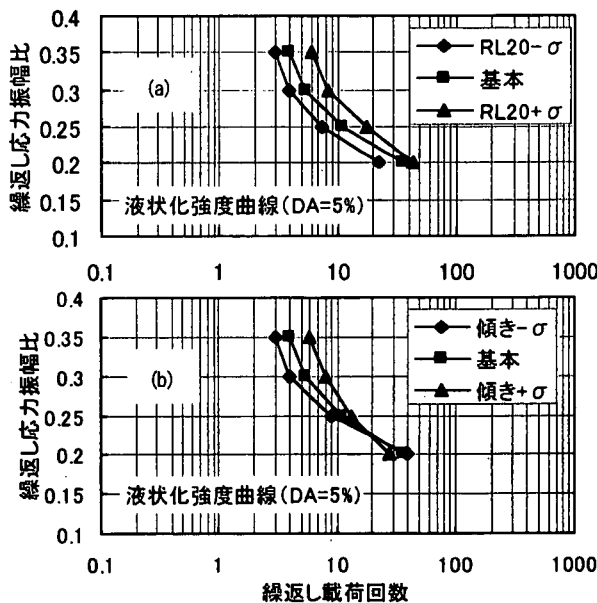


図-8 変動例（パラメータ 1）

方法、試験方法、供試体の乱れ等の不確実さが入っている。ここで求めた液状化強度曲線のバラツキは、これら全てによるバラツキである。ただし、緩い砂をチューブサンプリングする場合、サンプルの密度が原地盤の状態を中心にばらつくのではなく、密度が増加することが知られているが、本研究ではこのことが液状化強度曲線に及ぼす影響は考慮していない。

3. 2 解析結果

図-8に液状化強度曲線の変動結果（パラメータ1）を示す。図-8(a)が近似直線の傾きを固定し、 R_{L20} を変動させ平行移動したもの、図-8(b)が R_{L20} を固定して液状化曲線が R_{L20} の点で交差するように傾きを変動させたものである。パラメータ2においても同様に變動させ、解析を行った。図-9にパラメータ1、2それぞれの盛土天端沈下量を示す。液状化強度曲線を変動させた場合の盛土沈下量に及ぼす影響は、基本パラメータの沈下量に対してパラメータ1、パラメータ2ともに、それぞれ最大2割程度であった。

以上の結果から、液状化強度曲線の傾き・ R_{L20} 及び沈

下量のバラツキを正規分布すると仮定して表-3に示すように、盛土天端沈下量の標準偏差 σ 、変動係数を求めると³⁾、パラメータ1では、標準偏差 $\sigma=0.105\text{m}$ 、変動係数=27.9%、パラメータ2では、標準偏差 $\sigma=0.026\text{m}$ 、変動係数=8.6%となった。また、得られた結果より、次のような信頼性設計への利用法が考えられる。

たとえば今回の簡易解析モデルと同じ盛土構造物の耐震性評価を行うとする。本解析と同じ淀川堤防観測波を入力し、盛土構造物の許容沈下量が1mとしたとき、許容値1mを越える確率を求める。ここで、表-3の解析結果による盛土天端沈下量のバラツキが対数正規分布と仮定すれば、この盛土構造物が1m以上沈下する確率は0.02%、許容沈下量を0.5mとすると、0.5m以上沈下する確率は13.99%となる。また、盛土天端沈下量のバラツキを正規分布すると仮定して同様に求めると、1m以上沈下する確率は0.003%、0.5m以上では11.9%となる。

4. まとめ

本論文では、LIQCA を用いて基礎地盤の液状化による盛土の沈下解析を行った。その結果、液状化強度曲線と液状化後のひずみの伸びが盛土沈下量の支配的要因であることがわかった。

また、既往の液状化強度試験結果から、液状化強度曲線自体の変動幅を調べ、その変動が動的解析結果に与える影響を調べた結果、盛土天端沈下量の変動は最大で2割程度であった。さらに、この結果による盛土天端沈下量の頻度分布を仮定することにより、LIQCA を用いて信頼性設計が出来る可能性を示した。

謝辞：本研究は第一著者が国土交通省 土木研究所に交流研究員として派遣中に行ったものであり、本研究を行うにあたり、多大なるご指導、ご協力を頂いた渦岡良介氏（理化学研究所）ならびに元国土交通省 土木研究所 動土質研究室の皆さまに深く感謝いたします。

参考文献

1) Oka, F., Yashima, A., Tateishi, A., Taguchi, Y. and Yamashita, S.: A cyclic elasto-plastic constitutive model for sand considering a plastic-strain dependence of the shear modulus, Geotechnique, Vol. 49, No. 5, pp. 661-690, 1999
2) 松尾, 岡村, 田本：法先固化改良による盛土の耐震対策効果に関する動的遠心模型実験報告書, 土木研究所資料 第3688号, 2000.
3) Duncan: "Factors of Safety and Reliability in Geotechnical Engineering" Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol.126, No.4, PP.307-316, 2000

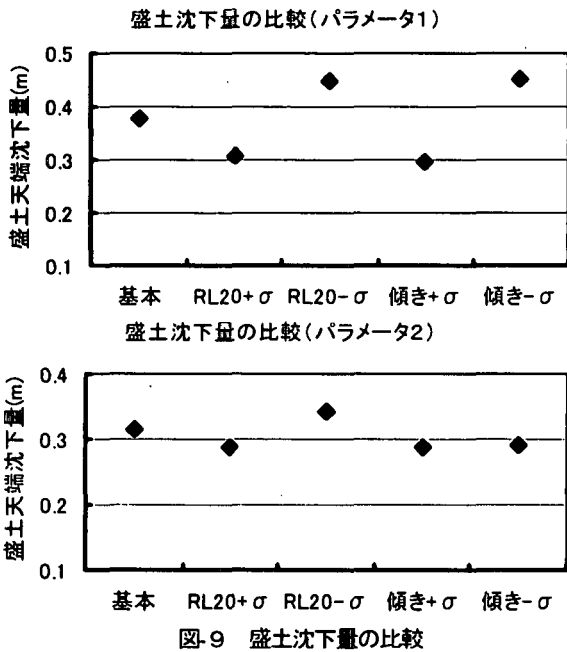


表-3 解析結果の評価例
(パラメータ1)

変動項目	R_{L20}	傾き	沈下量 (m)	沈下量差 (m)
$R_{L20}+\sigma$	0.241	-0.271	0.307	0.140
$R_{L20}-\sigma$	0.203	-0.271	0.447	
傾き+ σ	0.223	-0.336	0.296	0.156
傾き- σ	0.223	-0.206	0.452	
沈下量平均				0.376
標準偏差	$\sigma = \sqrt{(0.14/2)^2 + (0.156/2)^2} = 0.105$			
変動係数	$V=0.105/0.376=0.279$			