

多重等価線形解析による液状化解析手法の提案

Liquefaction Analysis of Soil Systems Based on the Multi-Equivalent Linear Method

宇高竹和 (うだか たけかず)

(株)地震工学研究所 代表取締役

内田 治 (うちだ おさむ)

(株)地震工学研究所 技術部長

田中典明 (たなか のりあき)

東京電力(株)電力技術研究所 主管研究員

佐藤 博 (さとう ひろし)

東京電力(株)電力技術研究所 主管研究員

1. はじめに

等価線形法¹⁾による全応力解析は、各要素に対して動的変形特性から一つの代表的な物性値を仮定する線形解析である。この等価線形法は比較的簡便であり、ある程度のひずみレベルに対しては信頼性が高い。しかしながら、地盤の液状化現象のように物性が急激に変化する現象では、一つの代表的な物性値で急激な変化を表現することは困難である。ただし、この欠点を克服すれば解析的に簡便であり、実務設計上、対応しやすく有効と考えられる。

そこで、物性が急激に変化する前後を分割することでグループ化を行い、各々のグループごとに独立した等価線形解析を実施する。当然ながら、各グループの要素には、別々の代表的な動的変形特性を用いる。ここで得られた各グループごとの結果を最後に重ね合わせることで最終結果とする。この解析手法を多重等価線形法と呼び、本文で等価線形法の拡張という位置付けで提案する手法である。通常の等価線形法では、一要素一物性値でしか

表現できないが、多重等価線形法は、一要素複数物性値で表現できることで新規性があると考えられる。

多重等価線形法に際しては、上記で示した内容を含む三つの特長が考えられる。以降にその特長を簡潔に示す。

- ① 解析上、ある時間を境として全く動的変形特性が異なる場合を考慮することができる。
- ② グループ化に伴い、各地盤や構造物の相互作用を時刻変化に準ずる評価ができる。
- ③ 地震力(外力)の時刻変化に準ずる物性の変化を表現できる。

特長①は、先に述べたものである。液状化現象のように、地震時のある瞬間で全く異なる物性に変化するような場合、物性変化時刻で分割し、前後間で異なる動的変形特性を用いることができる。

具体的には、図-1に示す液状化現象を例に挙げる。まず、液状化前と液状化後の二つのグループに分ける。各グループでは、異なる動的変形特性を用いて独立した等価線形解析を実施する。ここで、各グループに与える入力地震動も液状化前と液状化後に分けて入力する。最後に、互いの独立した解析結果を重ね合わせることで最終結果とする。

次に、特長②に着目すると、通常の等価線形解析の場合、各要素の最大せん断ひずみ(あるいは有効せん断ひずみ)から物性値を決定するが、最大せん断ひずみの発生時刻が各要素で異なる影響に関しては考慮していない。今回提案した多重等価線形法ではグループ化を行うことで、最大せん断ひずみの発生時刻が各要素で異なる影響を考慮することができる。

例えば、図-2(a)に示すような2層構造成層地盤で、上層部が t_1 秒で最大せん断ひずみ ε_{1max} が発生し、下層部が t_2 秒で ε_{2max} が発生したと仮定する。通常の等価線形解析では、最大せん断ひずみの発生時刻に関係なく、上層部 ε_{1max} 、下層部 ε_{2max} から物性値を決定する(システムA)。ここで、 t_1 秒と t_2 秒間の t 秒を境として2分割のグループ化を考えて多重等価線形解析を実施した場合、 t 秒前のグループにおける結果としては、図-2(b)のシステムBに示すように上層部は ε_{1max} 、下層部は ε_{2max} よりも小さな最大せん断ひずみとなることから、システムBは通常の等価線形解析(システムA)と異なる傾向を示すと考えられる。また、図-2(c)のシス

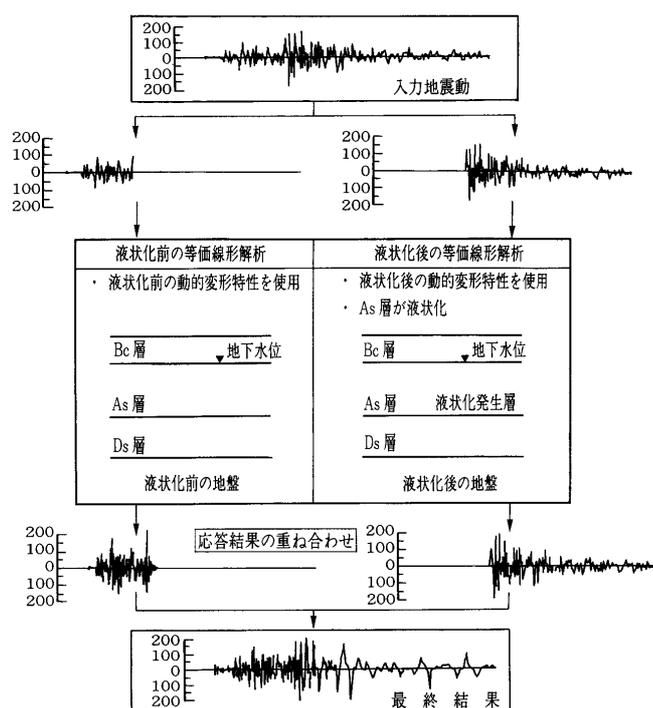
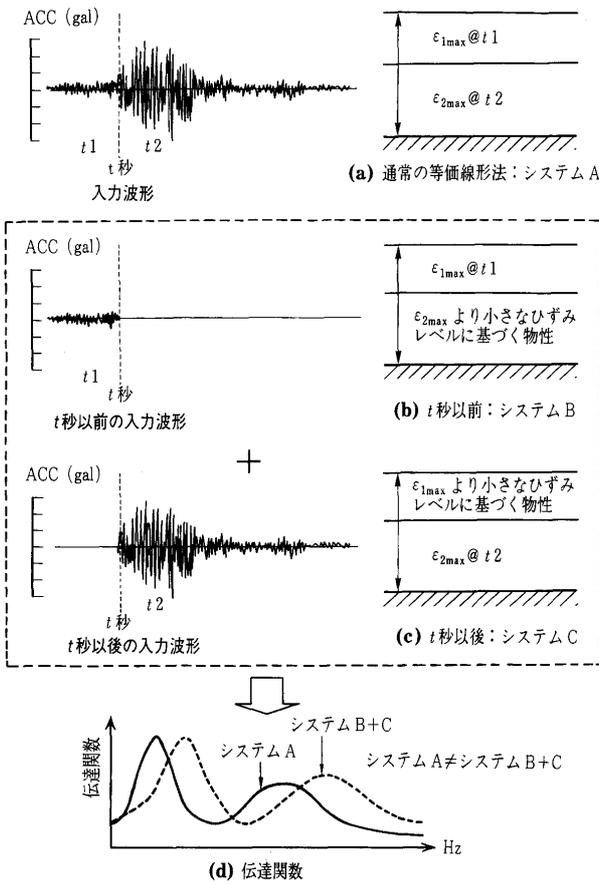


図-1 多重等価線形法の適用例1(特長①)



図—2 多重等価線形法の適用例2 (特長②)

システムCに対しても同様である。したがって、伝達関数は、図—2 (d)に示すようにシステムごとで異なった傾向が見られ、その特性が重ね合わせた最終結果に反映される。

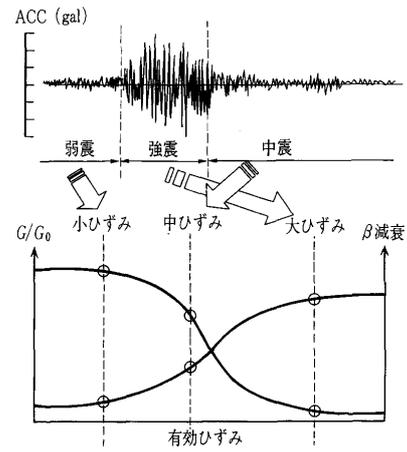
最後に特長③に関しては、グループ化に伴ってグループごとに等価な物性を用いることにより、解析精度の向上が期待できると考えられる。図—3に示した例では、入力地震動を弱震、強震および中震にグループ化し、各々のグループごとに異なる物性を用いることから、時間的変化に準ずる物性の変化を表現できると考えられる。

2. 多重等価線形法による簡易的な液状化解析方法

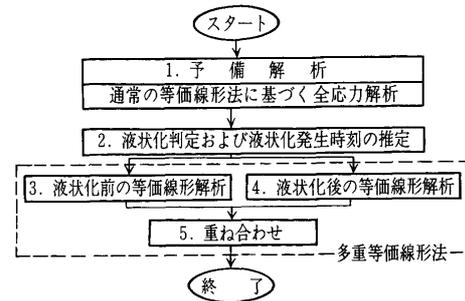
1. で示した多重等価線形法の特長①に基づき、地盤の液状化を考慮する簡易的な解析方法を示す。図—4に解析概要のフローチャートを示す。

項目1における予備解析では、液状化の判定と液状化発生時刻の推定を行うために必要な通常の等価線形法に基づく全応力解析を実施する。

項目2の液状化判定および液状化発生時刻の推定では、累積損傷度の概念^{2),3)}を適用することで液状化判定および液状化発生時刻を推定する。すなわち、項目1で実施した全応力解析によるせん断応力時刻歴の正負半波ごとのピーク値を $\tau_i (i=1, 2, \dots)$ とする。また、繰返し三軸試験による液状化強度曲線から、せん断強度比 $R_i (R_i = \tau_i / \sigma_v', \sigma_v'$ は有効上載圧)に対する繰返し回数を N_i として、 $\Sigma 1 / (2N_i)$ が1以上となる時刻を液状化発



図—3 多重等価線形法の適用例3 (特長③)



図—4 解析概要フローチャート (液状化解析)

生時刻とする。

項目3における液状化前の等価線形解析とは、項目2の液状化発生時刻に基づき、液状化前と液状化後にグループ化した前半部分である。ここでは、項目1の予備解析と同様に、液状化前の動的変形特性を用いた通常の等価線形解析を実施する。しかしながら、入力地震動は、項目1と異なり、0.0秒から液状化発生時刻までを対象とする。

項目4における液状化後の等価線形解析とは、項目3の後半部分であり、入力地震動は、液状化発生時刻から最後までを対象とする。項目2の液状化判定結果に基づき、液状化を発生した要素には、液状化を考慮した動的変形特性を用いて解析を実施する。なお、液状化を考慮した動的変形特性に関しては、次章で説明を加える。

最後に、項目5の重ね合わせでは、項目3および4で得られた解析結果 (応答波形) を重ね合わせることで最終結果を求める。

3. 多重等価線形法で用いる液状化後の動的変形特性

多重等価線形法で用いる液状化発生後の動的変形特性に関しては、今後更なる検討が必要と考えられるが、現時点での見解を以降に示す。

既往の研究成果として、安田ら⁴⁾は、豊浦砂について繰返しねじりせん断試験を実施し、過剰間隙水圧が発生した状態で単調載荷試験を行うことで砂の動的変形特性を検討され、過剰間隙水圧と剛性低下率との関係を相対密度、せん断ひずみをパラメーターにして整理している。

これらの研究成果から豊浦砂の場合には、液状化発生後、剛性低下率は0.004~0.001程度と推測される。

成川ら⁵⁾の研究では、相対密度が80%の豊浦砂を使用した液状化時の地盤反力係数の低下に関する実験を行っている。この研究成果から液状化発生後、豊浦砂の剛性低下率は約0.01と推測される。

小笠原ら⁶⁾は、様々な砂の液状化による剛性低下を研究されている。この研究では、豊浦砂、まさ土および東京地区の砂の3種類を対象として、剛性低下率の相違を細粒分含有率の差に着目してとりまとめられている。この研究成果から、まさ土および豊浦砂では、液状化発生後の剛性低下率が約0.001~0.08となっているが、東京地区の砂地盤に関しては、かなりのばらつきがあるもののおおむね0.01程度以上となっている。

以上の既往の研究成果を踏まえて、多重等価線形法の液状化発生後に用いる動的変形特性は、以下のように考えると良好な応答が得られると考えられる。

- 剛性低下率は0.01~0.05程度とする。
- 減衰比は、過去の経験上から液状化発生前を使用する最大減衰比とする。
- 液状化を発生しない要素は、液状化発生前の動的変形特性を用いる等価線形とする。

4. 多重等価線形法による実例解析

本章では、3.で示した多重等価線形法の手順に従い、実際に液状化現象を発生したと思われる鉛直プレー観測記録を用いて地震観測シミュレーション解析（液状化解析）を実施する。そして、加速度の時刻歴や応答スペクトルに着目して実記録と比較検討する。

4.1 解析条件および解析手順

シミュレーション解析で用いる地震観測記録は、1987年11月23~24日、米国カリフォルニア州インペリアルバレー（ワイルドライフ）で得られた鉛直プレー観測記録^{7),8)}である。加速度記録は、地表とG.L.-7.5mの2深度で観測されている。23日の地震（以降、地震-1と称す）は、マグニチュードが5.8、地表最大加速度126 galを記録したが（図-5参照）、液状化は発生しなかった。24日の地震（以降、地震-2と称す）は、マグニチュードが6.1、地表最大加速度201 galを記録し（図-6参照）、加速度記録や過剰間隙水圧記録（図-7参照）から地盤は、ほぼ液状化しているものと思われた。そこで、地震-1を用いた同定解析を実施し、地盤物性の妥当性や不明確である地盤のひずみ依存性を算定する。

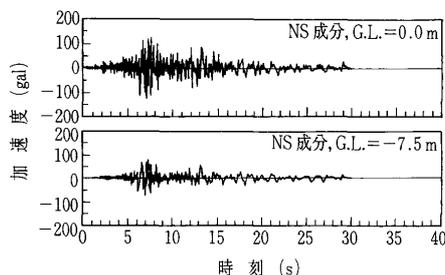


図-5 地震-1の観測記録（NS方向）^{7),8)}

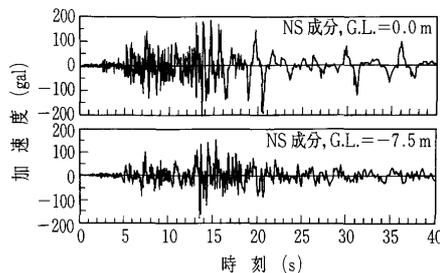


図-6 地震-2の観測記録（NS方向）^{7),8)}

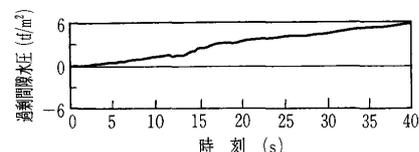


図-7 地震-2の過剰間隙水圧記録（G.L.-5.0m）⁸⁾

表-1 地盤構造および地盤物性諸元

観測地点	深度 (m)	土質	層厚 (m)	単位体積重量 $\gamma(t/m^3)$	せん断波速度 $V_s(m/s)$
● 0.0 m 水位	-1.2	シルト	1.20	1.60	99.0(92.0)
		シルト	1.30	1.94	99.0(92.0)
	-2.5	硬質シルト	1.00	1.97	116.0(137.0)
	-3.5	シルト砂質	3.30	1.97	116.0(137.0)
	-6.8	粘土	0.70	2.00	130.0(154.0)
● -7.5 m					

注) 表内の () 内に同定解析で使用した V_s 値を示す。

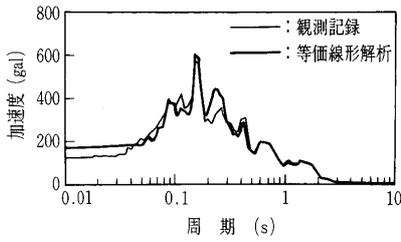
次に、得られた地盤の特性を踏まえて、地震-2に基づく多重等価線形法によるシミュレーション解析を実施する。すべての解析は、G.L.-7.5mで得られた観測記録を入力として与え、地表の実記録と解析結果とを比較するものである。表-1に地盤構造および物性諸元を示す。

4.2 地震-1に基づく同定解析結果

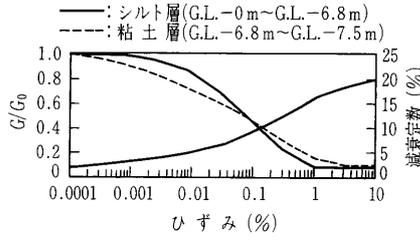
地盤物性の妥当性や不明確である地盤の動的変形特性を推定する目的で実施した地震-1に基づく同定解析の結果を以下に示す。図-8に、地表のNS方向における実記録と解析結果の加速度応答スペクトルを示すが、実記録と解析結果とは、おおむね同様の傾向を示していることで、同定解析の妥当性が認められる。また、EW方向に関してもNS方向と同様の結果が得られている（結果割愛）。図-9に、同定解析で使ったひずみ依存曲線を示す。なお、地盤物性に際しては、表-1で示した各層の V_s を若干変更したが、他の諸元に関しては変更はない。

4.3 地震-2に基づく地震観測シミュレーション解析結果

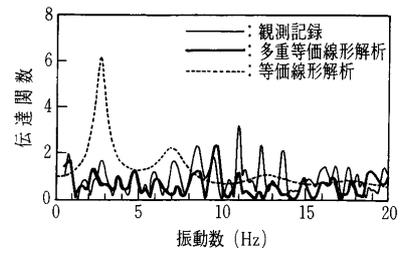
上記で示した同定解析結果を踏まえて、地震-2に基づく地震観測シミュレーション解析を実施した結果を以下に示す。表-2にNS方向を対象とした液状化判定結果を示すが、各層で若干異なるものの、約13.6秒で液状化を発生する結果となっていた。ここで、図-7の過剰間隙水圧記録（NS方向）に着目すると、約13.0秒から過剰間隙水圧の上昇が見られていることから、液状化判定の妥当性が認められた。したがって、今回の多重等価線形解析は、13.6秒の前後で2分割し、前後における各々の解析を実施した。なお、液状化後における液状化地盤の剛性低下率は0.04を用いた。図-10にG.L.-7.5mに対する地表の伝達関数（NS方向）、図-11に地表の加速度応答スペクトル（NS方向）、および図-12に地表の加速度時刻歴（NS方向）を示す。これらの図中に



図—8 地表の加速度応答スペクトル (NS 方向：地震-1)



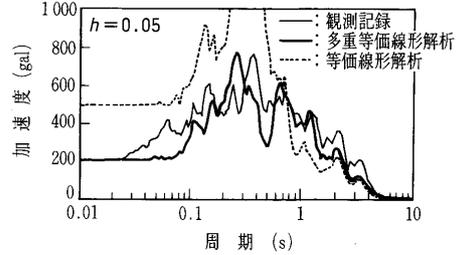
図—9 ひずみ依存曲線



図—10 地表の G.L.-7.5 m に対する伝達関数 (NS 方向/NS 方向：地震-2)

表—2 各地層ごとの液状化判定結果 (地震-2)

観測地点	深度 (m)	土質	液状化発生時刻 (s)	収束剛性率 (G/G_0)	収束減衰 (h %)
0.0 m 水位	-1.2	シルト	—	0.68	6.5
	-2.5	シルト	13.815	0.22	12.5
	-3.5	硬質シルト	13.665	0.45	9.2
	-6.8	シルト砂質	13.660	0.30	12.0
-7.5 m		粘土	—	0.40	10.0



図—11 地表の加速度応答スペクトル (NS 方向：地震-2)

は、比較のために通常の等価線形解析結果をも示す。

通常の等価線形解析結果は、実記録と比較して差異が顕著に見られるものの、多重等価線形解析結果は、おおむね実記録を表現していると思われた。なお、EW 方向に関しても NS 方向と同様の傾向が確認された (結果割愛)。

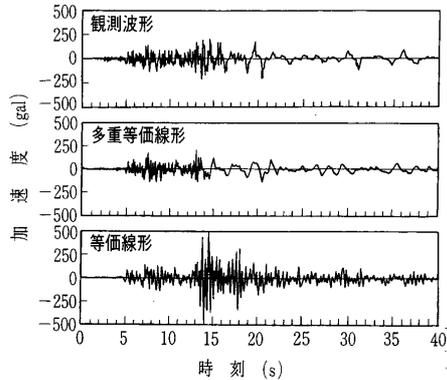
5. まとめ

等価線形法の拡張として、今回、多重等価線形法を提案し、地盤における液状化現象のような急激に物性の变化が生じる問題に対して対処することを試みた。多重等価線形法を用いた 1 解析事例である地震観測シミュレーション解析で得られた知見および今後の課題を以下に要約する。

- 1) 今回提案した多重等価線形解析では、通常の等価線形解析よりも地震観測シミュレーション解析の観点で、観測記録を表現することができたと思われる。特に、両解析結果における応答相違は、顕著に見られ、通常の等価線形解析では、観測記録よりも解析結果がかなり大きくなってしまいう傾向が見られた。
- 2) 今後は、多重等価線形法の汎用性を確立すべく、様々な解析事例で検討する方針であり、二次元問題への拡張や、液状化発生時刻の算定における精度の向上等の検討を行う予定である。また、多重等価線形法の特徴を生かして様々な動的問題に応用していく予定である。

参考文献

- 1) Lysmer, J., Udaka, T., Tsai, C-F., Seed, H. B.: Flush—A Computer Program for Approximate 3-D Analysis of Soil—Structure Interaction Problems, EERC Report No. EERC 75-30, University of California, 1975.
- 2) Lee, K. L. and Chan, K.: Number of Equivalent Sig-



図—12 地表の加速度時刻歴 (NS 方向：地震-2)

- 3) Seed, H. Bolton, Lee, K. and Idriss, I. M.: Analysis of Sheffield Dam Failure, JSMFD, ASCE, Vol. 95, No. SM6, pp. 1453~1490, 1969.
- 4) 規矩大義・安田 進・増田民夫・板藤 繁・峯啓一郎：液状化した砂の強度・変形特性に関するねじりせん断試験，第9回日本地震工学シンポジウム，pp. 871~876, 1994.
- 5) 成川匡文・土方勝一郎・大島 豊・西村 功・内川祐一郎・柳下文雄・久保賀也・塩見忠彦・馬場崎亮一：SRモデルによる杭基礎建築物の地震応答解析における液状化の考慮方法，その5 模型試験による液状化時の地盤反力係数の算定，日本建築学会学術講演梗概集，pp. 363~364, 1997.
- 6) 小笠原政文・牧田篤弘・安田 進・黛 廣志・原田克之：液状化した地盤のせん断剛性率の評価，地震時の地盤・土構造物の流動性と永久変形に関するシンポジウム，地盤工学会，pp. 321~324, 1998.
- 7) 福武毅芳・大槻 明・藤川 智：三次元液状化解析による実測記録のシミュレーション，第27回土質工学研究発表会，pp. 1103~1106, 1992.
- 8) 五十嵐俊一・志田智之：地震動のエネルギーから推定した過剰間隙水圧と実測値，第28回土質工学研究発表会，pp. 959~962, 1993.

(原稿受理 1999.10.26)