

MDMモデル依存非線形全応力解析による北海道釧路沖地震のアレー観測記録の再現と液状化判定

上田稔¹・熊崎幾太郎¹・山崎浩之²・恒川和久³

¹正会員 工博 中部電力(株) 技術開発本部 (〒459-8522 愛知県名古屋市長区大高町字北関山20-1)

²正会員 工修 港湾空港技術研究所 地盤・構造部 (〒239-0826 神奈川県横須賀市3-1-1)

³正会員 工修 (株)シーテック 技術コンサルタント部 (〒455-0054 愛知県名古屋市長区遠若町3-7-1)

地盤の液状化判定を適切に行うには、地震応答解析により地盤応答を精度良く把握するとともに、適切な液状化強度比を用いることが重要である。本稿では、著者らが提案するMDMモデル依存非線形全応力解析により、北海道釧路沖地震時の釧路西港でのアレー観測記録を対象に再現シミュレーション解析および液状化判定を行った結果について述べる。解析手法としては、MDMモデル依存非線形全応力解析のほかに、比較検討のためSHAKE, FDEL, 修正R-0モデル依存非線形全応力解析も実施した。液状化判定では、凍結サンプリングした供試体を用いた繰返し非排水三軸試験で得られた液状化強度比を用いた。MDMモデル依存非線形全応力解析によれば、加速度波形、フーリエスペクトルの精度良い再現ができ、その場合に得られるせん断応力を用いた場合には液状化状況を適正に判定できた。

Key Words: MDM model, liquefaction judgement, nonlinear total stress seismic analysis, observed array records, reploduciong analysis

1. はじめに

地盤の液状化判定を適切に行うには、信頼ある地震応答解析により地盤応答を精度良く再現し、適切な液状化強度比を用いることが重要である。

地盤の地震応答解析法が十分な信頼性を有するかは、実地震での観測記録の解析による良好な再現が可能かどうかによって確認されなければならない。しかも、複数の地点、複数の地震に対する良好な再現ができてこそ、信頼性のある地震応答解析法であるという評価がなされるべきである。また、信頼性のある地震応答解析を行うには、地盤の速度構造、非線形性などの解析条件を適正に設定することも不可欠である。しかも、その設定方法は地点や地震に関わらず同一でなければならない。このような観点から、著者らは、既に地盤の剛性と減衰のひずみ依存性を高精度に再現可能なMDMモデル^{1), 2), 3)}を用いたMDMモデル依存非線形全応力解析(以下、MDM)により、いくつかの地点のアレー観測記録を対象に再現シミュレーション解析を実施し、良好な再現結果を得ている^{4), 5)}。

本稿では、このMDMを用いた北海道釧路沖地震時に釧路西港で観測されたアレー観測記録⁶⁾の再現シミュレーション解析、および液状化判定について述べる。解析手法としては、MDMのほかに等価線形解析(以下、SHAKE)、振動数依存等価線形解析(以下、FDEL)、修正R-0モデル依存非線形全応力解析(以

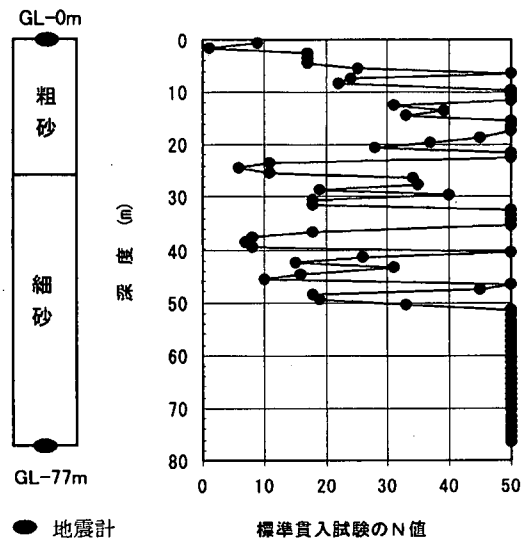


図-1 地震計設置位置とN値の分布⁶⁾

表-1 解析対象地震の諸元と液状化状況

観測年月日	マグニチュード	震源深さ(km)	震央距離(km)	液状化状況 ⁶⁾
1993年1月15日	7.8	103	13	地表面には液状化した痕跡なし

下、修正R-0)も行った。液状化判定では、現地で凍結サンプリングした供試体を用いた繰返し非排水三

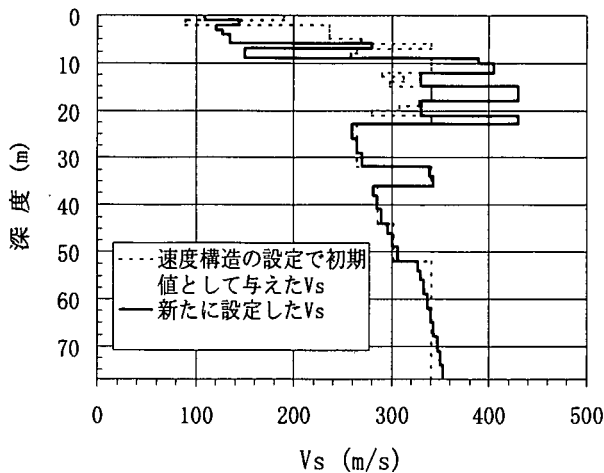


図-2 地盤の初期の速度構造

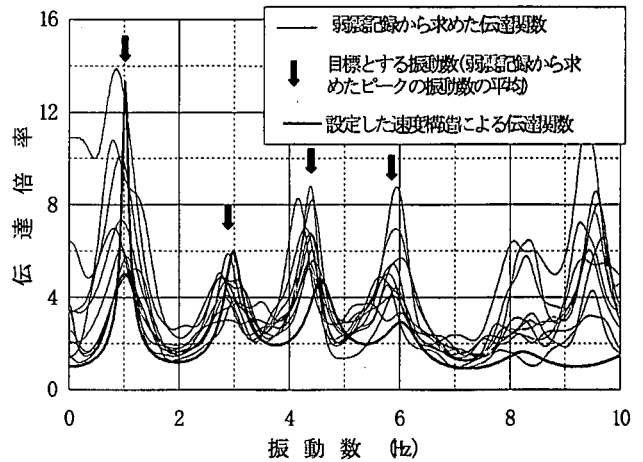


図-3 伝達関数

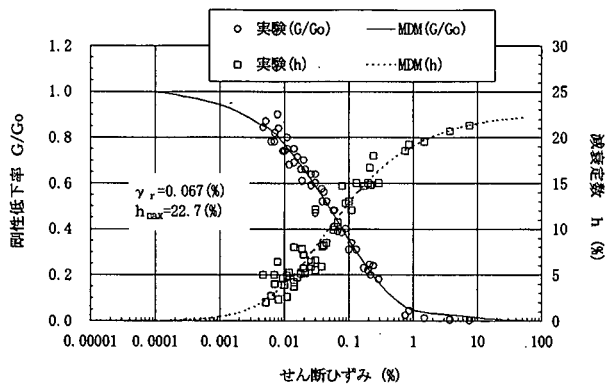


図-4 MDMモデルによるひずみ依存曲線の再現状況

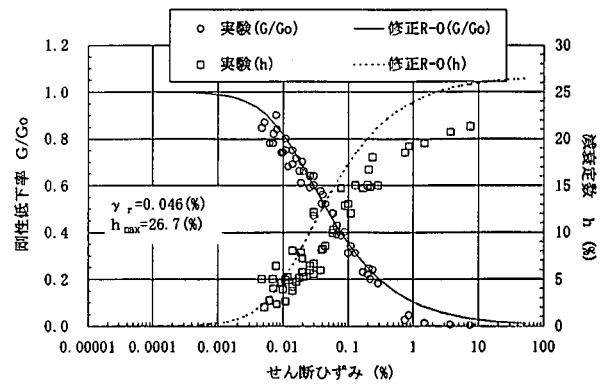


図-5 修正R-0モデルによるひずみ依存曲線の再現状況

軸試験で得られた液化化強度比⁶⁾を用いた。

2. 再現シミュレーション解析の概要

図-1に地盤構成，地震計設置位置（●印），およびN値の深度分布を示す⁶⁾。表-1に解析対象地震の諸元，液化化状況を示す⁶⁾。文献6)によれば，地表面では液化化した痕跡は認められなかった。解析では，図-1に示すGL-77mでの観測加速度時刻歴を入力し，地表面での観測地震波の再現シミュレーションを行った。

3. 解析条件

(1) 地盤の速度構造の設定

深度23m以浅は(1)式，深度23m以深は文献6)をもとにせん断波速度（以下，Vs）を設定し，

$$Vs = 89.8 * N^{0.341} \quad (1)$$

このVsを初期値として，北海道釧路沖地震とは別に観測された弱震記録の伝達関数を再現するように，モンテカルロシミュレーションにより，新たにシミュレーション解析に用いるVsを設定した。(1)式は，既往の研究から提案されているN値からのVsの換算式であるが，アレー観測地点から50m程離れた地点で実施されているPS検層によるVsとN値の関係とも

概ね合っている⁶⁾。伝達関数の算定に用いた弱震記録は，鉛直上方に伝播していると考えられる震源距離が150km以上，最大加速度が10cm/s²以下の5地震10成分である。

初期の速度構造を図-2に示す。新たに設定したVsによる伝達関数を弱震記録より求めた伝達関数と合わせて図-3に示す。図中の細実線が弱震記録から求めた伝達関数，その伝達関数のピークの平均が↓，新たに設定したVsによる伝達関数が太実線である。4次のピークの振動数まで再現できており，その結果としてGL-77mと地表面の観測記録の主要動の立ち上がりのゼロクロスから求めた伝播時間も再現できた。設定の際に初期値として与えたVsによる伝達関数は，3,4次のピークの振動数が15%程度高振動数側にずれていて，伝播時間も10%程度短く，再現状況は良好ではなかった。

(2) 地盤の非線形性の設定

MDMと修正R-0では，それぞれの非線形モデルが繰返し三軸試験により得られる地盤の剛性と減衰のひずみ依存性試験データを最小の誤差で再現するようにそれぞれのモデルのパラメータを決定した。その再現状況を図-4，図-5に示す。剛性低下率の試験データが○印，実線がモデルによる再現である。同様に，減衰定数の試験データが□印，点線がモデル

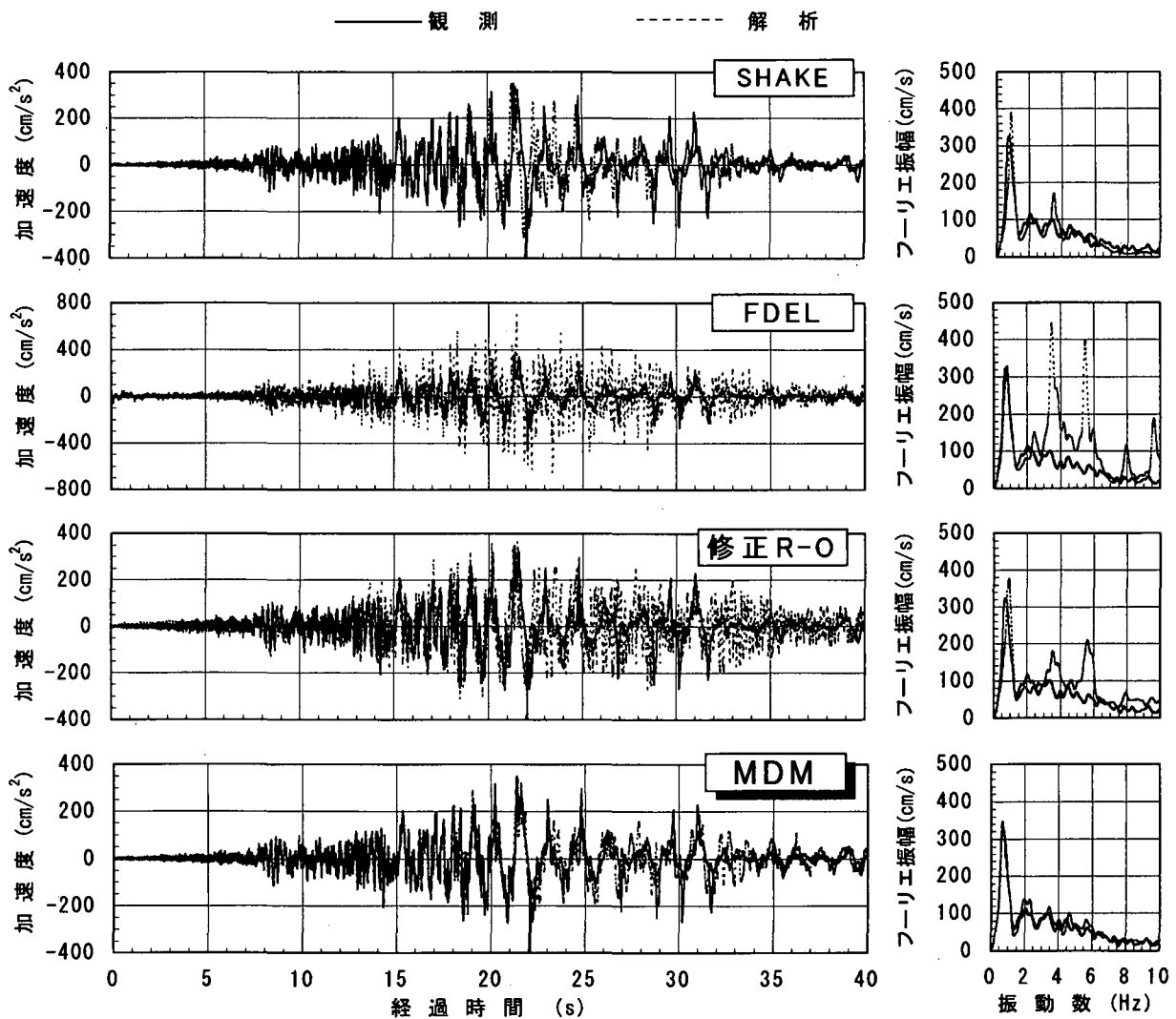


図-6 加速度時刻歴波形，加速度フーリエスペクトルの観測と解析の比較

による再現である。MDMモデルでは、ひずみが小さな領域から大きな領域まで実験を良好に再現できている。一方、修正R-0モデルでは、ひずみが大きな領域で実験とモデルの差異が生じている。また、これら2つの非線形モデルの拘束圧依存性を考慮して、それぞれのモデルの参照ひずみ（以下、 γ_r ）^{1),2),3)}を(2)式により、深度ごとに設定した。

$$\gamma_{r2}/\gamma_{r1} = (\sigma_{m2}'/\sigma_{m1}')^{0.5} \quad (2)$$

γ_{r2} : 任意の深度の γ_r

γ_{r1} : 繰返し三軸試験の結果から設定した γ_r

σ_{m2}' : 任意の深度の有効拘束圧

σ_{m1}' : 繰返し三軸試験の有効拘束圧

一方、SHAKE、FDELについては、MDMで設定した剛性と減衰のひずみ依存性の値そのものを深度ごとに与えた。

(3) 解析メッシュサイズ、積分時間刻み

解析メッシュサイズは、1mとした。積分時間刻みは、0.002秒とした。積分時間刻み0.001秒でも解析したが、結果は同一であった。

4. 解析結果

各種解析法による地表面の加速度時刻歴波形、フーリエスペクトルの再現状況を図-6に示す。実線が観測、点線が解析である。

MDMでは、加速度時刻歴波形、フーリエスペクトルともに良好に再現できている。なお、紙面の都合で割愛するが、地盤の非線形性の拘束圧依存を考慮しなかった場合の再現状況は良好ではなかった。

SHAKEでは、比較的良好に再現できているが、1次の振動数成分(0.7Hz)が20%程度大きく、3.5Hz付近の振動数成分も観測に比べて卓越している。

FDELでは、1次の振動数成分(0.7Hz)は再現できているが、3~6Hzの高振動数成分が大きく卓越しており、加速度時刻歴波形も観測に比べてかなり大きくなっている。

修正R-0では、1次の振動数成分(0.7Hz)が20%程度大きく、3~6Hzの高振動数成分が卓越しており、加速度時刻歴波形も観測に比べて大きくなっている。

各種解析法による液状化判定結果を図-7に示す。液状化判定は、(3)式の液状化抵抗指数（以下、 F_L

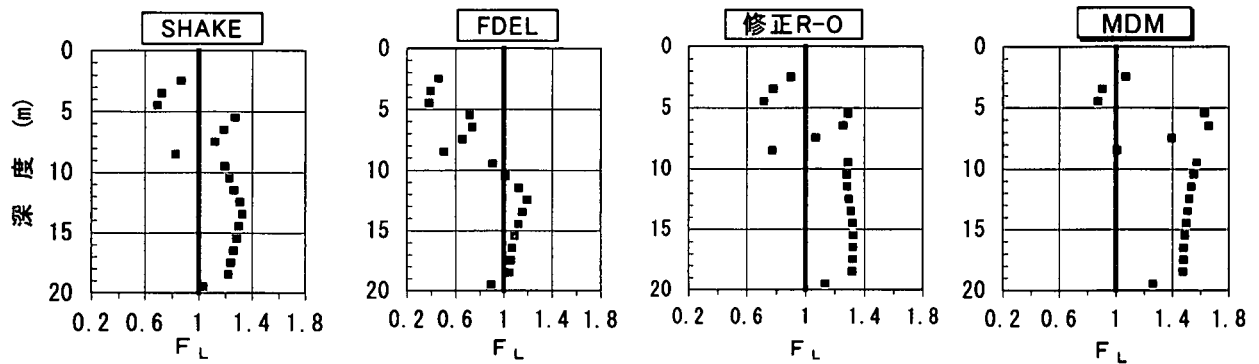


図-7 各種解析法による F_L 値

値) で表す。

$$F_L = R / (\tau_{max} / \sigma_v') \quad (3)$$

R : 液状化強度比

τ_{max} : 解析で得られた最大せん断応力

σ_v' : 有効鉛直応力

液状化強度比は、凍結サンプリングした供試体を用いた繰返し非排水三軸試験で得られた液状化強度比と等価N値の関係(図-8)から設定した。ここで等価N値は、図-1に示すN値をもとに、(4)式から算定した。また、等価N値が25より大きい場合の液状化強度比は0.6である。

$$N_{0.66} = \frac{N - 1.828(\sigma_v' - 0.66)}{0.399(\sigma_v' - 0.66) + 1} \quad (4)$$

$N_{0.66}$: 等価N値

N : 標準貫入試験によるN値

σ_v' : 有効鉛直応力(kgf/cm²)

F_L 値の深度分布を比較するとMDMでは表層部で1.0をわずかに上回っていてその直下で0.9程度であり、「地表面には液状化した痕跡なし」⁶⁾という観察結果を再現できている。また、観測波形は経過時間22秒以降で若干長周期化し、サイクリックモビリティに似た波形が表れており、液状化したかしなかったかの境目にあつたことが分かる。表層部において0.9~1.1の範囲に分布する F_L 値は、この現象を表していることがわかる。一方、SHAKE、修正R-Oでは、地表面から深度5m付近まで F_L 値が0.7~0.9でMDMによる F_L 値に比べて20%程度小さく、「地表面には液状化した痕跡なし」という観察結果を再現できていない。FDELについては、地表面から深度9m付近まで F_L 値が0.3~0.7でMDMによる F_L 値に比べて50%程度小さく、観察結果を再現できていない。

5. まとめ

(1) 地盤の剛性と減衰のひずみ依存性を高精度に再現可能なMDMモデル非線形全応力解析によれば、加速度時刻歴波形、フーリエスペクトルを良好に再現できた。一方、SHAKE、FDEL、修正R-Oでは、加速度が観測に比べて大きかった。

(2) 凍結サンプリングによる供試体を用いた繰返し非排水三軸試験で得られた液状化強度比を用いて、

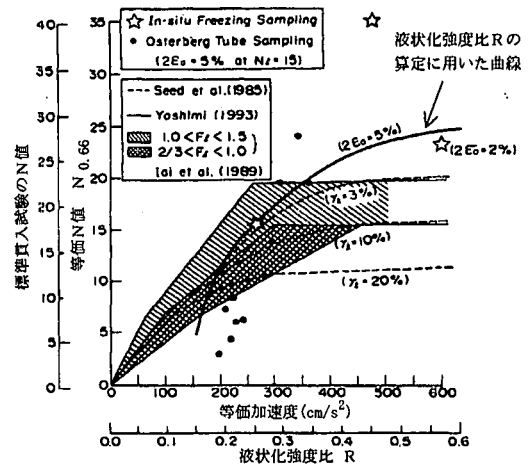


図-8 液状化強度比と等価N値の関係⁶⁾

液状化判定を実施したところ、MDMモデル依存非線形全応力解析では液状化状況を適正に再現できた。一方、SHAKE、FDEL、修正R-Oでは、 F_L 値が小さくなった。

(3) 地盤の初期速度構造、非線形性、解析メッシュサイズ、積分時間刻みの解析条件を同一の考え方で設定し、複数のアレー観測記録を良好に再現できている^{4), 5)}、今回のシミュレーション解析でもその設定方法の妥当性が確認された。

参考文献

- 熊崎幾太郎, 杉山武, 上田稔: Hysteresis Model Considering Shear-Strain Dependency of Fractal Dimension and Momentary Deformation Modulus, Proceedings of International Association for Mathematical Geology, pp. 602-607, イタリア, 1998年10月。
- 熊崎幾太郎, 上田稔: 瞬間変形係数のひずみ依存性を考慮した履歴モデルの定式化, 第54回土木学会年次学術講演会講演概要集, I-B111, pp. 220-221, 1999年9月。
- 熊崎幾太郎, 上田稔: 液状化地盤応答解析が可能な非線形全応力モデルによる乾燥砂と飽和砂の要素シミュレーション~MDMモデルによる乾燥砂の極度の剛性低下率と急峻なひずみ軟化および流動的挙動の再現, 第56回土木学会年次学術講演会講演概要集, 第III部門, 2001年10月。
- 上田稔, 熊崎幾太郎, 恒川和久, 今枝康博: MDMモデル依存非線形全応力解析によるいくつかの実地盤応答アレー観測記録の再現 ~高精度な非線形全応力解析による地盤の液状化判定~, 第56回土木学会年次学術講演会講演概要集, 第I部門, 2001年10月。
- 上田稔, 熊崎幾太郎, 今枝康博, 恒川和久, 永坂英明: MDMモデル依存非線形全応力解析によるいくつかの実地盤応答アレー観測記録の再現, 第26回地震工学研究発表会, 2001年8月。
- Susumu IAI, Toshikazu MORITA, Tomohiro KAMEOKA, Yasuo MATSUNAGA, Kazuyuki ABIKO: Response of a Dense Sand Deposit During 1993 KUSHIRO-OKI Earthquake, SOILS AND FOUNDATIONS, Vol. 35, pp. 115-131, 1995. 3.