

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モデルによる飽和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～

中部電力(株) 技術開発本部 電力技術研究所 正会員 ○熊崎幾太郎, 上田 稔

1. はじめに

同様の粒度分布と土粒子の密度を有する地盤要素であっても、それが乾燥した状態の供試体の排気条件下における動的ねじり試験結果と、飽和した状態の供試体の非排水条件下における動的ねじり試験結果とは、一般に、大ひずみ領域において大きく異なり、後者は大ひずみ領域において、極度の剛性低下率すなわち急峻なひずみ軟化を示すことがあるため、参照せん断ひずみの上載圧依存性で地盤要素の剛性と減衰の連続的な上載圧依存性を考慮可能なタイプの従来の非線形全応力モデルでは、これを高精度に要素シミュレーションすることが不可能であった。しかし、逐次非線形全応力地震応答解析により、良好な精度で液状化地盤の応答解析を行い得るためには、前者のみならず後者も要素シミュレーション可能な非線形モデルを用いる必要がある。そこで、本稿では文献1)～4)等において提案した非線形モデルであるMDM (Momentary Deformation Modulus)モデルが乾燥砂のみならず飽和砂も適用可能対象であるかを実証的に検証するため、乾燥した豊浦標準砂の排気条件下の動的ねじり試験結果と飽和した豊浦標準砂の非排水条件下の動的ねじり試験結果を対象に、要素シミュレーションを行った結果について述べる。

2. 骨格部と履歴部の双方にMDMのひずみ依存性を考慮した非線形モデル

一般に、MDMモデルの骨格部と履歴部は次のような関数 f あるいは g を有する関数 G により表せる。

$$\begin{aligned} \tau &= G(|\gamma|) \cdot \gamma & \tau &= \tau^* + G(|\gamma - \gamma^*|/2) \cdot (\gamma - \gamma^*) & G(x) &= \frac{G_{MDM}(|\gamma|)}{1 + f(x, \gamma_r, h_{max})} & (1a), (1b), (1c) \\ \text{あるいは,} & & & & & & & \\ \gamma &= \frac{1}{G(|\tau|)} \cdot \tau & \gamma &= \gamma^* + \frac{1}{G(|\tau - \tau^*|/2)} \cdot (\tau - \tau^*) & G(y) &= \frac{G_{MDM}(|\gamma|)}{1 + g(y, \gamma_r, h_{max})} & (2a), (2b), (2c) \end{aligned}$$

ここに、上記の式(1a)、(1c)あるいは式(2a)、(2c)がMDMモデルの骨格部を表し、式(1b)、(1c)あるいは式(2b)、(2c)がMDMモデルの履歴部を表して、 γ_r と h_{max} はそれぞれ参照せん断ひずみと最大履歴減衰係数であり、 $G_{MDM}(|\gamma|)$ はせん断ひずみレベル $|\gamma|$ における瞬間変形係数である。MDMモデルを特徴づける上記のモデルパラメタ $G_{MDM}(|\gamma|)$ の物理的意味については、文献5)等に詳述してある。また、 γ^* と τ^* はそれぞれ履歴荷重が反転する点のせん断ひずみとせん断応力を表す。なお、上式の関数 f あるいは g として、既存の非線形モデルの関数形を用いることができるのはもとより、独自に定義した関数形を用いることも可能である。

上式(1a)～(2c)の通り、MDMモデルでは骨格部と履歴部が $G(x)$ あるいは $G(y)$ と記した同一の関数により表されるという意味において、MDMモデルはMasingの第1法則を満足している。さらに、履歴部の式は骨格部の式を γ 軸方向と τ 軸方向の双方に2倍した形であるため、MDMモデルではMasingの第2法則も成立している。

一方、MDMモデルの等価せん断剛性率 G_{eq} と履歴減衰係数 h のせん断ひずみレベル $|\gamma|$ に対する依存性曲線は、上式(1a)～(2c)に対応して次式で表せる。

$$\frac{G_{eq}(|\gamma|)}{G_{MDM}(|\gamma|)} = \frac{1}{1 + f(|\gamma|, \gamma_r, h_{max})} \quad \text{あるいは} \quad \frac{G_{eq}(|\gamma|)}{G_{MDM}(|\gamma|)} = \frac{1}{1 + g(G_{eq}(\gamma) \cdot \gamma, \gamma_r, h_{max})} \quad (3a), (3b)$$

さらに、各ひずみレベルにおける $h(|\gamma|)$ の値は、後述する式で求めておく $G_{MDM}(|\gamma|)$ の値と上式(3a)あるいは(3b)により求められる $G_{eq}(|\gamma|)$ の値を次の関数 k で表される $G_{MDM}(|\gamma|)$ と $G_{eq}(|\gamma|)$ 、 $h(|\gamma|)$ との関係式に代入し、 $h(|\gamma|)$ について求めれば得られる。

$$\frac{G_{eq}(|\gamma|)}{G_{MDM}(|\gamma|)} = k(h(|\gamma|), h_{max}) \quad (4)$$

なお、モデルの G_{eq} 、 $h \sim |\gamma|$ 関係曲線の形状を決定するモデルパラメタ γ_r と h_{max} の値は、各ひずみレベルの $G_{MDM}(|\gamma|)$ の値を用いながら、式(3a)あるいは式(3b)と式(4)によるモデルの $G_{eq}(|\gamma|)$ 、 $h(|\gamma|)$ が試験結果そのものの値あるいは試験結果に相当する近似値 $G_{eq}(\gamma)_{experiment}$ 、 $h(\gamma)_{experiment}$ をすべての試験データのひずみ範囲において最小の誤差で再現するように決定する。このように決まる γ_r および h_{max} の値と $G_{MDM}(|\gamma|)$ を用いれば、式(1a)、(1b)、(1c)あるいは式(2a)、(2b)、(2c)により、任意の地震波形荷重下において、微小ひずみ領域から地盤が液状化したり、鋼構造部材が座屈するような大ひずみ領域まで、非線形要素の支配的な動的物性値である $G_{eq}(\gamma)_{experiment}$ 、 $h(\gamma)_{experiment}$ を高精度に再現した繰返し $\tau \sim \gamma$ 関係を時々刻々非線形解析へ反映させることが可能である。

式(1a)、(1b)、(1c)あるいは式(2a)、(2b)、(2c)で表されるMDMモデルの繰返し $\tau \sim \gamma$ 関係のモデルパラメタは、 γ_r 、 $G_{MDM}(|\gamma|)$ の2種類、あるいは γ_r 、 h_{max} 、 $G_{MDM}(|\gamma|)$ の3種類のみであり、 $G_{MDM} \sim |\gamma|$ 関係は、次式に $G_{eq}(|\gamma|)_{experiment}$ および $h(|\gamma|)_{experiment}$ の値を代入して求める。

$$\frac{G_{eq}(|\gamma|)_{experiment}}{G_{MDM}(|\gamma|)} \equiv k(h(|\gamma|)_{experiment}, h_{max}) \quad (5)$$

因みに、式(5)は $G_{MDM} \sim |\gamma|$ 関係を求めるための一般的な形を示した式であり、関数 f

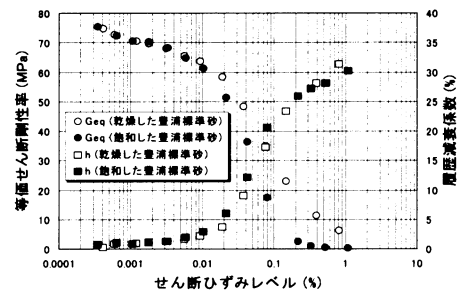


図-1 豊浦砂の G_{eq} 、 $h \sim \gamma$ 関係試験データ

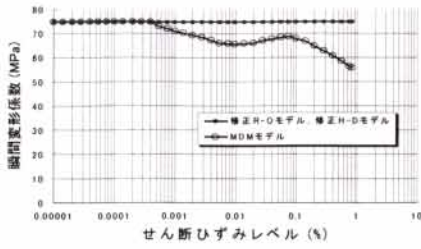


図-2 乾燥砂のGMDMのひずみ依存性

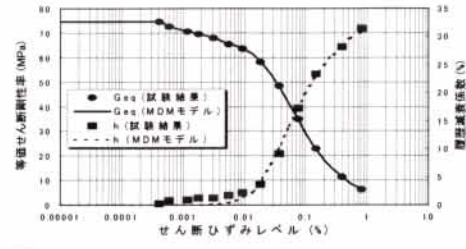


図-3 乾燥砂のGeq, h ~ γ関係の再現結果

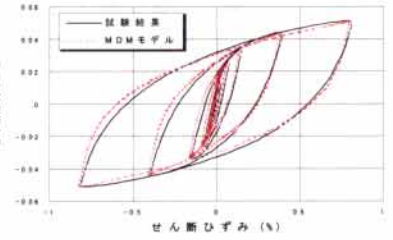


図-4 乾燥砂の要素シミュレーション結果

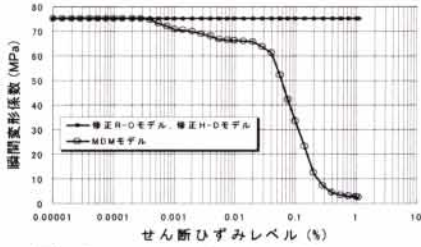


図-5 飽和砂のGMDMのひずみ依存性

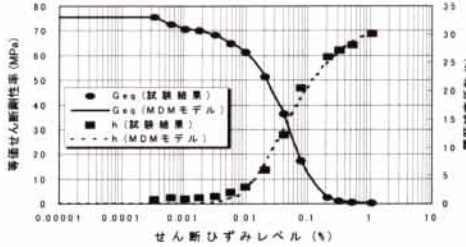


図-6 飽和砂のGeq, h ~ γ関係の再現結果

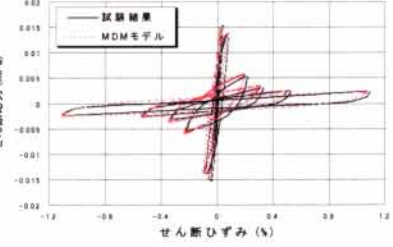


図-7 飽和砂の要素シミュレーション結果

あるいは g として独自に定義したのものをいれば、式(5)の具体的な形も独自のものになる。本稿では関数 f あるいは g として、既存の非線形モデルの関数形を用いた場合の式(5)の具体例を記述すると、修正R-0モデルをMDMモデルへ拡張する場合には、

$$\frac{G_{eq}(\gamma)_{experiment}}{G_{MDM}(\gamma)} \equiv -\frac{1}{h_{max}} \cdot h(\gamma)_{experiment} + 1 \quad \text{すなわち} \quad G_{MDM}(\gamma) = \frac{h_{max} \cdot G_{eq}(\gamma)_{experiment}}{h_{max} - h(\gamma)_{experiment}} \quad (6)$$

であり、修正H-DモデルをMDMモデルへ拡張する場合にはモデルパラメタとして h_{max} を用いるの必要がなく次式になる。

$$h(\gamma)_{experiment} \equiv \frac{2}{\pi} \cdot \left[\frac{1 + \frac{G_{eq}(\gamma)_{experiment}}{G_{MDM}(\gamma)}}{1 - \frac{G_{eq}(\gamma)_{experiment}}{G_{MDM}(\gamma)}} + \frac{2 \cdot \frac{G_{eq}(\gamma)_{experiment}}{G_{MDM}(\gamma)}}{\left\{1 - \frac{G_{eq}(\gamma)_{experiment}}{G_{MDM}(\gamma)}\right\}^2} \cdot \ln \left\{ \frac{G_{eq}(\gamma)_{experiment}}{G_{MDM}(\gamma)} \right\} \right] \quad (7)$$

なお、式(7)は $G_{MDM}(\gamma)$ について陽な形をしていないため、陰解法により $G_{MDM}(\gamma)$ の値を求めることになる。

3. MDMモデルによる要素シミュレーション結果

図-1に示した乾燥砂と飽和砂の G_{eq} , $h \sim |\gamma|$ 関係試験データと、それらの元である $\tau \sim \gamma$ 関係試験データを対象に、式(6)で $G_{MDM}(\gamma)$ を求める場合のMDMモデルによる要素シミュレーションを行った。図-2、図-3、図-4は乾燥砂に対する結果であり、図-5、図-6、図-7は飽和砂に対する結果である。また、この時のMDMモデルのパラメタは乾燥砂の場合 $\gamma_r = 0.077\%$, $h_{max} = 34.691\%$ であり、飽和砂では $\gamma_r = 0.060\%$, $h_{max} = 33.068\%$ である。

4. まとめ

乾燥砂では、図-2のように瞬間変形係数がせん断ひずみレベルの増大に応じて大きくは低下しないため、図-3、図-4のようにMDMモデルによって高精度な要素シミュレーションが可能であるのはもとより、 γ_r の上載圧依存性で G_{eq} , $h \sim |\gamma|$ 関係の連続的な上載圧依存性を考慮可能なタイプの従来の非線形モデルによっても同様に良好な要素シミュレーション結果が得られる。しかし、飽和砂の場合は図-5のように、上記したタイプの従来の非線形モデルでは、せん断ひずみレベルが1%程度になると、実際の瞬間変形係数のひずみ依存性に比べて非常に大きな差異が生ずるため、このようなせん断ひずみ領域では実測値と良好に一致する要素シミュレーションは不可能になる。一方、 γ_r の上載圧依存性に基づき G_{eq} , $h \sim |\gamma|$ 関係の連続的な上載圧依存性を考慮可能なタイプで全応力表示により定式化したMDMモデルでは、瞬間変形係数のひずみ依存性の考慮により、有効応力と間隙水圧に分離した定式化を行わなくとも図-6の通り、簡便かつ忠実に飽和砂の極度の剛性低下率を再現可能であるため、図-7の如くひずみ硬化挙動はもとより、急峻なひずみ軟化挙動、およびその後の流動的挙動も高精度に再現する要素シミュレーションを実現できている。ゆえに、従来は不可能と考えられてきた液状化地盤応答のアレー観測記録の非線形全応力解析による良好な精度の再現シミュレーションがMDMモデルを組み込んだ簡便な非線形全応力解析によって可能になった⁶⁾のは、上述のような要素シミュレーションに対するMDMモデルの実用的かつ柔軟な適用性によるものと考察される。

参考文献

- 1) 熊崎幾太郎: Hysteresis Model Considering Shear Strain Dependency of Fractal Dimension and Momentary Deformation Modulus, 博士論文(京都大学), 第7章, 1998年3月。
- 2) 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。
- 3) 熊崎幾太郎, 杉山 武, 上田 稔, 長谷川英明: 瞬間変形係数のひずみ依存性を考慮した履歴モデル, 第53回土木学会年次学術講演会講演概要集, III-A 89, pp.176-177, 1998年10月。
- 4) 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。
- 5) 熊崎幾太郎, 上田稔: MDMモデルによる飽和した豊浦標準砂のひずみ軟化領域に渡る要素シミュレーション ~非線形全応力モデルによる G_{eq} , $h \sim \gamma$ 関係と応力~ひずみ関係の再現~, 第36回地盤工学研究発表会発表講演集, 2001.6。
- 6) 上田 稔, 熊崎幾太郎, 恒川和久, 今枝靖博: MDMモデル依存非線形全応力解析によるいくつかの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36回地盤工学研究発表会発表講演集, 2001.6。