

MDMモデルによる骨格曲線の上載圧依存性を 考慮した液状化地盤震動シミュレーション ～ G_{eq} , $h \sim \gamma$ 関係の上載圧依存性考慮の有無による 地盤応答再現精度の差異に関する一考察～

熊崎 幾太郎¹・上田 稔¹・永坂 英明²

¹正会員 工博 中部電力株式会社 技術開発本部 電力技術研究所 (〒459-8522 名古屋市緑区大高町20-1)

²正会員 株式会社CTI 科学技術部 技術開発グループ (〒450-0003 名古屋市中村区名駅南一丁目27番2号)

地盤要素が液状化するような大ひずみ領域に渡り,地盤要素の剛性と減衰のひずみ依存性を高精度に再現可能な非線形モデルによって,骨格曲線などの上載圧依存性を考慮するかどうか液状化地盤震動アレー観測記録の再現シミュレーションの精度に影響しているかを把握するため,MDMモデル依存非線形全応力解析により,土槽内の液状化地盤震動アレー観測記録を対象とする再現シミュレーションを行った.その結果,MDMモデルにより地盤要素の非線形性の上載圧依存性を考慮した場合の方が考慮しなかった場合に比較して,液状化地盤震動アレー観測記録の加速度時刻歴波形や加速度フーリエスペクトルをより良好な精度で再現可能であることが明らかになった.

Key Words : MDM model, hysteresis curves, hysteresis model, reproducing simulation, vertical array records

1. 緒言

地盤要素の非線形性が上載圧に依存して変化することは従来からよく知られており,地盤の地震応答解析においても,地盤要素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(以下, G_{eq} , $h \sim |\gamma|$ 関係と記す)の上載圧依存性を考慮することの重要性が認識されて来ている.そこで,本論文では提案しているMDMモデル¹⁾を用い,地盤要素の非線形性の上載圧依存性を考慮しない場合と考慮する場合において,MDMモデルを構成式として用いた非線形全応力解析により,土槽内の飽和した豊浦標準砂の液状化地盤震動アレー観測記録を対象に,それぞれ再現シミュレーションを行った結果を比較した.そして,MDMモデルによる G_{eq} , $h \sim |\gamma|$ 関係,破壊強度 τ_f および骨格曲線の上載圧依存性考慮の有無が液状化地盤震動の再現シミュレーションの精度に及ぼす影響について考察する.

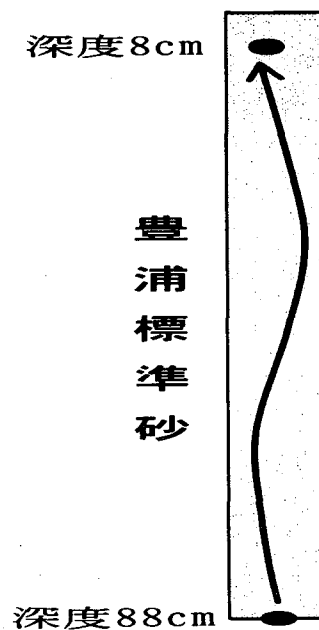


図-1 土槽震動アレー観測

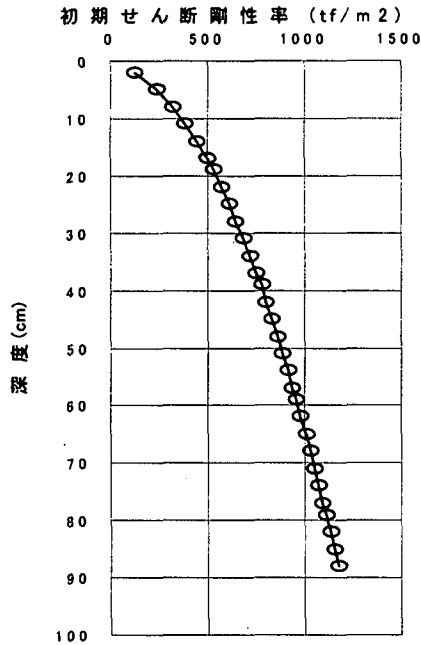


図-2 地盤の G_0 の深度方向分布

2. 土槽内の液状化地盤震動アレー観測記録

MDMモデルを構成式として用いた非線形全応力解析、すなわちMDMモデル依存非線形全応力解析による再現シミュレーションの対象にしたのは、入力加震レベルが153.2Galの1983年日本海中部地震波形外力により、円柱形土槽につめた飽和状態の豊浦標準砂を振動させて、液状化状態に至らしめた時の地盤応答加速度のアレー観測記録である^{2), 3)}。土槽実験での入力加震位置と本論文で再現シミュレーションの対象にした地盤応答記録の観測位置は、図-1に示した土槽内の地盤の略図に●印で示してある。この土槽実験では、入力加震が地表面からの深度88cmの位置で行われ、一方、再現シミュレーションの対象にした観測記録は、8cmの位置の地震計でとられた地盤応答加速度の時刻歴である。そして、再現シミュレーションでは、深度88cmの地震計でとられた入力加速度時刻歴の実記録を解析の入力値とし、解析で深度8cmの地盤応答加速度時刻歴を求めて、その深度における実記録との比較を行った。

3. 解析条件

(1) 初期せん断剛性率 G_0 の深度方向分布の設定

153.2Galの本加震の前には、5Gal程度の微小加震が行われていた。この微小加震により求められた深度

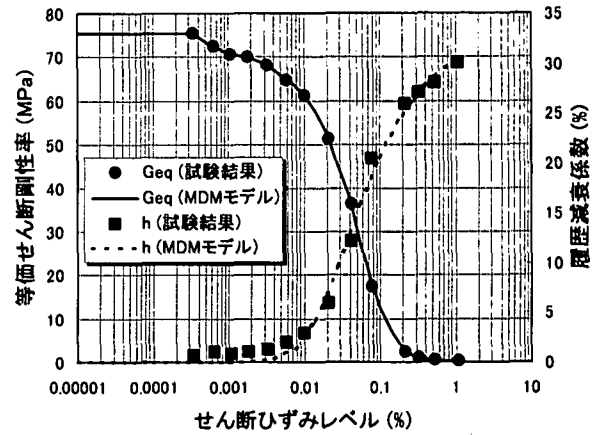


図-3 MDMモデルによる G_{eq} , $h \sim \gamma$ 関係の再現結果

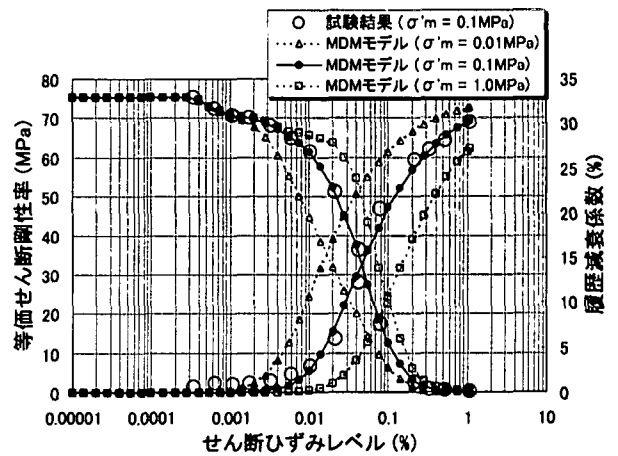


図-4 MDMモデルによる G_{eq} , $h \sim \gamma$ 関係の拘束圧依存性

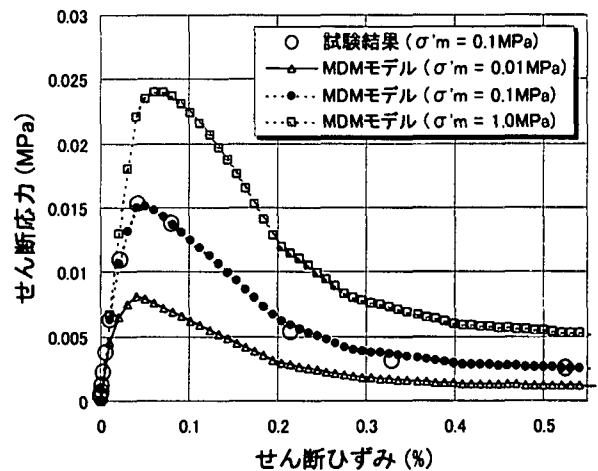


図-5 MDMモデルによる骨格曲線の拘束圧依存性

88cmでの微震動波と深度8cmでの微震動波の間の伝播時間と伝達関数に注目し、地盤の G_0 の上載圧依存性を考慮しつつ、モンテカルロシミュレーションにより、その微震動波の伝播時間と伝達関数の両方を最も高精度に再現するような G_0 の深度方向分布を同定して解析に用いた⁴⁾。解析に用いた G_0 の深度方向分布を図-2に示す。

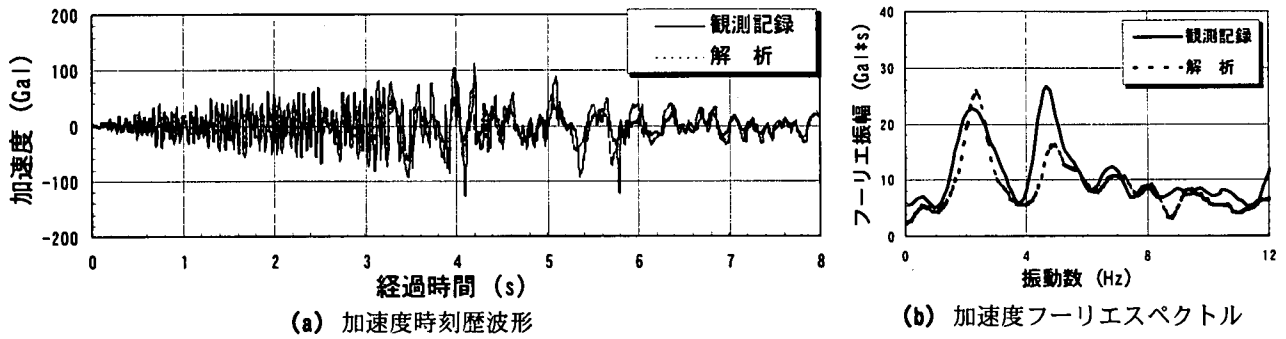


図-6 $G_{eq}, h \sim |\gamma|$ 関係の上載圧依存性を考慮しなかった場合の再現結果 (深度 8cm)

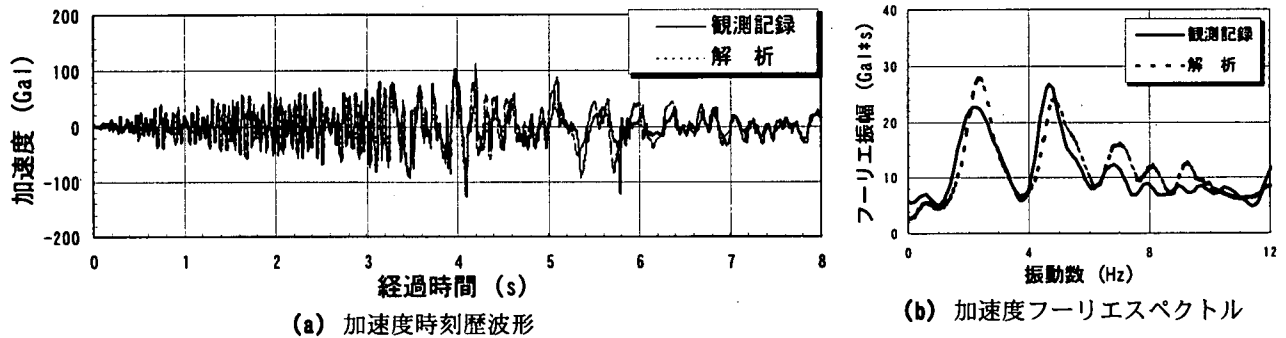


図-7 γ_r の拘束圧依存性により $G_{eq}, h \sim |\gamma|$ 関係の上載圧依存性を考慮した場合の再現結果 (深度 8cm)

(2) MDM モデルによる地盤要素の非線形性の設定

飽和した豊浦標準砂の剛性と減衰の非線形性は、文献5)、6)で述べているようにMDMモデルを用い、その砂の繰返しせん断応力 $\tau \sim$ せん断ひずみ γ 関係がひずみ軟化および液化化を呈するひずみ領域まで高精度に再現して解析へ反映させた。図-3は、ひずみ制御で14個のひずみレベルの载荷ステップに渡り、飽和した豊浦標準砂に11サイクルずつ繰返しねじり正弦波荷重を载荷したときの10サイクル目の履歴ループから求めた剛性と減衰のひずみ依存性試験データをMDMモデルにより再現した結果である。

(3) 地盤要素の非線形性の上載圧依存性の設定

MDMモデルは、地盤要素の液化化状態にまで渡り $G_{eq} \sim |\gamma|$ 関係試験データを極めて高精度に再現可能な非線形モデルである。しかし、 $G_{eq} \sim |\gamma|$ 関係試験データそのものを骨格部上の離散点に対応させ、それらの各2点間を線で結んだ時の線の集まりを骨格曲線として用いる非線形モデル⁷⁾とは異なり、骨格部と履歴部に同期した瞬間変形係数のひずみ依存性を考慮することにより、物理的意味の明確な少ない種類のモデルパラメータのみを含む骨格曲線関数式で $G_{eq} \sim |\gamma|$ 関係試験データに対応した骨格部上の $\tau \sim \gamma$ 関係試験データの非常に高精度な再現を可能にした非線形モデルである。ゆえに、MDMモデルではなめらかな連続性を保持しな

がら、地盤応答記録の高精度な再現シミュレーションのために重要な地盤要素の非線形性の上載圧依存性を容易に表現可能である。これは、モデルパラメータである参照せん断ひずみ γ_r の拘束圧依存性を考慮することによって為され得る。本論文で述べるMDMモデル依存非線形全応力解析を用いた土槽内の地盤震動記録の再現シミュレーションにおいても、この方法により、飽和した豊浦標準砂の非線形性の深度方向変化を考慮した。図-4は、MDMモデルによる $G_{eq}, h \sim |\gamma|$ 関係曲線の深度方向の拘束圧依存性を示したものであり、図-5はMDMモデルの骨格曲線の深度毎に異なる拘束圧に応じた変化を説明したものである。図-4と図-5で説明していることは、互いに表裏一体の関係で対応している。また、図-5より、MDMモデルでは、破壊強度 τ_f が深度方向の拘束圧に応じて変化して行くことを考慮し得ている様子が解る。

4. 解析結果

MDMモデル依存非線形全応力解析による土槽内の液化化地盤震動アレー観測記録の再現シミュレーション結果を図-6と図-7に示す⁸⁾。図-6および図-7は、それぞれ $G_{eq}, h \sim |\gamma|$ 関係の上載圧依存性を考慮しなかった場合と考慮した場合について、深度88cmの観測

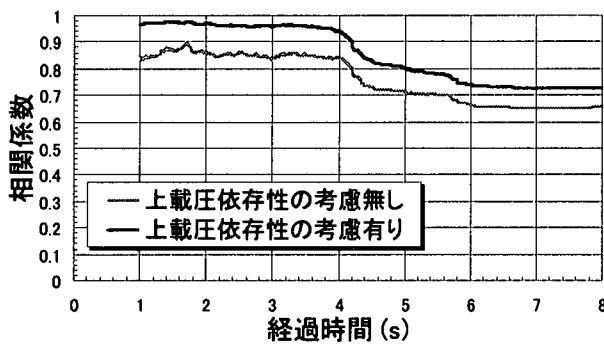


図-8 観測記録と解析結果の相関係数の時刻歴

記録の入力で深度8cmの加速度時刻歴とそのフーリエスペクトルを解析で求めた結果であり、これらを観測記録と対比して示したものである。

これらの結果より、MDMモデルを用いて G_{eq} , $h \sim |\gamma|$ 関係の上載圧依存性を考慮しなかった場合には、図-6に示される通り、加速度時刻歴波形や加速度フーリエスペクトルの観測記録と解析結果には、比較的大きな差異が認められる。一方、MDMモデルの γ_r の拘束圧依存性により地盤要素の G_{eq} , $h \sim |\gamma|$ 関係の上載圧依存性を考慮した場合には、図-7の如く初動の弱震動から強震動そして液状化状態まで加速度時刻歴波形の観測記録と解析結果はよく一致しており、また、加速度フーリエスペクトルも振動数にかかわらず、観測記録と解析結果は概ね一致しているのが分かる。さらに、図-8は解析過程における任意の時点までの観測記録と解析結果の相関係数を地盤応答加速度の時系列について逐次求めたもので、つまり解析による観測記録(深度8cm)の再現精度の時刻歴を意味するものである。この結果より、地盤要素の G_{eq} , $h \sim |\gamma|$ 関係の上載圧依存性を考慮しなかった場合に比べ、考慮した場合の方が観測記録と解析結果の相関度が高く、常に0.7以上の相関係数が得られており、より高い再現精度になっていることが定量的に分かる。

5. 結語

MDMモデルを用い、地盤要素の非線形性の上載圧依存性を考慮しなかった場合と考慮した場合について、MDMモデル依存非線形全応力解析により、土槽内の飽和した豊浦標準砂の液状化地盤震動アレー観測記録を対象に、それぞれ再現シミュレーションを行った結果を比較した。その結果より、MDMモデルによる G_{eq} , $h \sim |\gamma|$ 関係、破壊強度 τ_f および骨格曲線の上載圧依存性考慮の有無は液状化地盤震動の再現シミュレーションの精度に有意な影響を及ぼすことが明らかになった。

また、本論文で述べた解析による地盤応答観測記録の再現精度の結果より、初動の弱震動から強震動そして液状化状態まで加速度時刻歴波形やそのフーリエスペクトルを良好な精度で再現シミュレーションするためには、地盤の地震応答解析で構成式として用いられる非線形モデルがMDMモデルの如く次の2つの条件を同時に満足可能であるべきだと考察される。すなわち、1つ目の条件は地盤要素の室内動的変形試験で供試体に与えられた拘束圧下の $G_{eq} \sim |\gamma|$ 関係試験データを液状化領域まで極めて高精度に再現可能であること、2つ目の条件は G_{eq} , $h \sim |\gamma|$ 関係、破壊強度 τ_f および骨格曲線の上載圧依存性を適切に考慮可能なことである。

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)藤川 智, 佐藤正義, 福武毅芳, 大槻明: 二方向同時加振による液状化実験, 第28回土質工学研究発表会, pp.1201-1204, 1993年。
- 3)藤川 智, 福武毅芳, 大槻 明: 二方向同時入力による液状化実験のシミュレーション解析, 第22回地震工学研究発表会, pp.35-38, 1993年7月。
- 4)遠藤大輔, 上田 稔, 熊崎幾太郎, 永坂英明, 葛巻亜弥子: S波検層結果と鉛直アレー地震観測記録から求めた地盤の固有振動数および波動伝播時間の比較, 第36回地盤工学研究発表会発表講演集, 2001年6月。
- 5)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~, 第56回土木学会年次学術講演会講演概要集, 2001.10。
- 6)熊崎幾太郎, 上田 稔, 三島聡明: MDMモデルによる様々な地盤要素の繰返し応力~ひずみ関係の再現 ~非線形全応力モデルによる様々な飽和土の要素シミュレーション~, 第36回地盤工学研究発表会発表講演集, 2001年6月。
- 7)吉田 望, 辻野修一, 石原研而: 地盤の1次元非線形解析に用いる土のせん断応力~せん断ひずみ関係のモデル化, 日本建築学会大会学術講演概要集, 1990年10月。
- 8)熊崎幾太郎, 上田 稔, 永坂英明: MDMモデル依存非線形全応力解析による土槽内の液状化地盤震動アレー観測記録の再現, 第36回地盤工学研究発表会発表講演集, 2001年6月。