

H-D パラメータによる応力-歪モデルを用いた1次元有効応力解析

-その4 密な砂層を含む表層地盤の応答解析-

正会員 山崎 久雄*1
同 ○ 國光 修五*2
同 宮本 裕司*3

表層地盤 地震応答解析 有効応力解析
液状化 サイクリックモビリティ

1. はじめに

前報¹⁾では、土の応力-歪モデルに H-D モデル²⁾を用いた有効応力計算における破壊線の勾配 M_f を、砂の相対密度 D_r に応じ $D_r \leq 70\%$ の緩い砂では $M_f = \tan \phi_d$ とし、 $D_r > 70\%$ の密な砂では $M_f = \sin \phi_d$ とすることで観測記録に対応する結果が得られること、および判別に用いる D_r は液状化判定³⁾で用いる補正 N 値 N_a から $D_r = 16\sqrt{N_a}$ とできることを示した。

一方、サイクリックモビリティ (以下 CM と略す) を観測した前報²⁾ 地盤の液状化判定は比較的高い液状化抵抗比を示し、 F_L 値も 1 をわずかに下回る程度でその箇所も局所的である。このような場合、設計実務では有効応力解析での検討が軽視され、全応力解析が採用されることもあると思われる。

本報では、前報の密な砂を有する 2 地盤に対し、設計実務で用いられる基盤地震動⁴⁾ を入射し、CM の励起による設計用入力地震動や地盤変位⁵⁾ への影響を確認し、密な砂の特性を適切に反映させた有効応力解析の重要性を考察する。

2. 密な砂層を有する表層地盤の解析例

前報の密な砂層を有する PARI 釧路⁶⁾ と PARI 小名浜⁶⁾ の地盤を対象に解析を行う。地盤データには公開値⁶⁾ を用いた。

それぞれ砂層の破壊線勾配 M_f を、密な砂の特性を反映した $M_f = \sin \phi_d$ の場合 ($[\sin \phi_d]$)、単に内部摩擦角とした $M_f = \tan \phi_d$ の場合 ($[\tan \phi_d]$)、および全応力解析とした場合 ($[\text{Non-Liq}]$) を行う。基盤地震動は極稀レベルの告示波 (乱数位相) とした。

2.1. PARI 釧路 [Kushiro]

Kushiro 地盤の地表面加速度時刻歴を図 1 に示す。 $[\sin \phi_d]$ では 30 秒以後 CM によるスパイク状の波形が現れているが、 $[\tan \phi_d]$ では 40 秒以後で振幅がほとんど減衰した。また $[\text{Non-Liq}]$ では全時間で入射波に近い波形となった。

応答スペクトルと地中の最大過剰間隙水圧を図 2 に示す。応答スペクトルでは $[\sin \phi_d]$ で固有周期 0.5~2 秒において約 150cm/s の速度応答が生じる帯域が見られるが、 $[\tan \phi_d]$ や $[\text{Non-Liq}]$ での入射波に対する増幅はあまり大きくない。また最大過剰間隙水圧図より有効応力解析の両ケースとも GL-4 および -20m で過剰間隙水圧により有効応力が消滅したことを示している。

一方、図 3 の GL-4m の過剰間隙水圧比の時刻歴より $[\sin \phi_d]$ は変動を繰り返し水圧上昇しているが、 $[\tan \phi_d]$ は単調に上昇している。また、 $[\sin \phi_d]$ では水圧の変動が生じている時間帯で加速度にスパイク状の波形が現れ、両関連が明瞭である。

図 4 は地盤変位の最大値を示す。左は各層最大値、右は地

表面が最大変位時の地中の変位分布である。 $[\sin \phi_d]$ では GL-4m でやや変形するが結果的に $[\text{Non-Liq}]$ と同程度の変位分布となった。一方、 $[\tan \phi_d]$ では GL-4 および -20m において大きく変形し地表変位も他より大きく求まっており、各層最大値と地表面最大時の変位分布も大きく異なった。

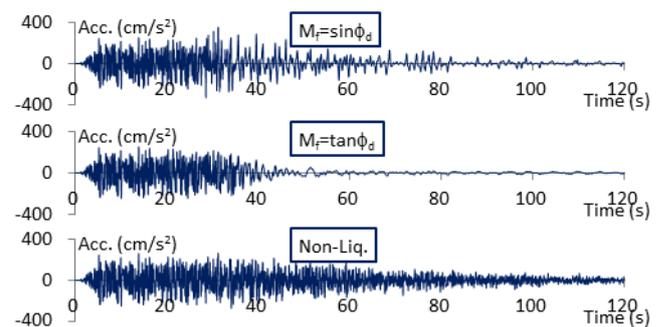


図 1 Kushiro GL-0m 加速度時刻歴

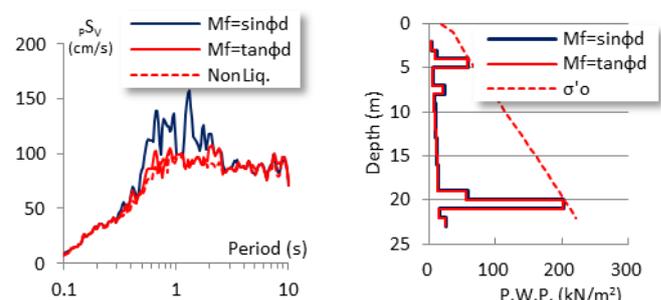


図 2 Kushiro 応答スペクトルと過剰間隙水圧

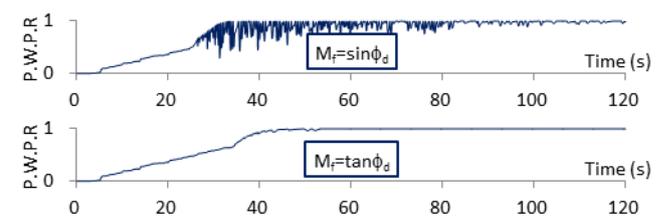


図 3 Kushiro GL-4m 過剰間隙水圧比時刻歴

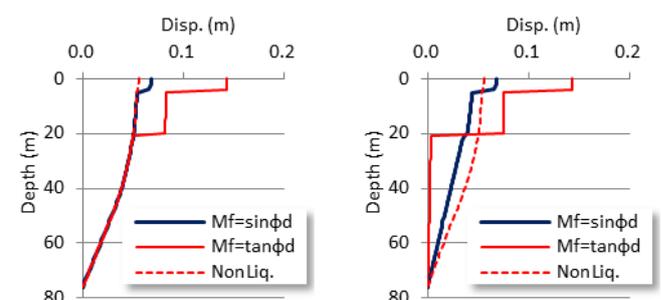


図 4 Kushiro 地盤変位 (左=各層最大, 右=GL 最大時)

2.2. PARI 小名浜 [Onahama]

Onahama 地盤の地表面加速度時刻歴を図 5 に示す。[$\sin\phi_d$] では CM によるスパイク状の波形がほぼ全時間で現れているが、[$\tan\phi_d$] では地震動の開始まもなく振幅が減衰した。また [Non-Liq] では全時間において入射波に近い波形となった。

応答スペクトルと地中の最大過剰間隙水圧を図 6 に示す。応答スペクトルでは、[$\sin\phi_d$] は 0.5 秒付近で約 200cm/s の、[$\tan\phi_d$] は 2.5 秒付近で約 150cm/s のピークを示した。両卓越周期はいずれも GL-1.3m での等価せん断剛性 ([$\sin\phi_d$] は 724kN/m²、[$\tan\phi_d$] は 35kN/m² であった) で求まるそれ以浅の地盤周期と一致することを確認した。[$\sin\phi_d$] では CM の影響により剛性低下が抑制されたことは明らかである。一方、[Non-Liq] では 0.2 秒付近で若干増幅するにとどまった。この周期も等価せん断剛性を用いた地盤周期に一致した。また最大過剰間隙水圧図より両ケースとも GL-1.3m で過剰間隙水圧により有効応力が消滅したことを示している。

図 7 の GL-1.3m の過剰間隙水圧比の時刻歴を見ると両ケースとも地震動の開始間もなく水圧が初期上載圧近くまで上昇するが、[$\sin\phi_d$] は大きな水圧の上下変動を長時間繰返しているのに対し、[$\tan\phi_d$] は水圧の上下変動はごくわずかで完全液状化の状態が最後まで継続している。Kushiro 地盤と同様に、[$\sin\phi_d$] では過剰間隙水圧の上下変動に起因する CM が地表面加速度や応答スペクトルの卓越周期に大きく影響していることが分かる。

図 8 は Onahama 地盤の各層地盤変位最大値および地表面最大変位時の地中変位分布である。有効応力解析による結果は GL-1.3m で変位が進行し、全応力解析に対し地表変位が大きく求まるが、[$\sin\phi_d$] での最大変位に比べ [tanφ_d] では約 3 倍程度大きく求まった。また Onahama 地盤では表層地盤の厚さが約 10m と浅いためと思われるが、各層最大値と地表面最大時の地中変位分布に大きな違いは生じなかった。

3. まとめ

前報の検証に用いた Kushiro 地盤と Onahama 地盤において、砂層の破壊線勾配の設定に密な砂を反映させた場合と単にそれを内部摩擦角とした場合の有効応力解析、および全応力解析の 3 ケースを設定し、極稀レベルの基盤地震動を入射した応答解析を行い、それぞれの結果の相違を確認した。

本検討地盤のように表層が密な砂層と判別され、また液状化の発生予測が軽微である場合であっても、密な砂の特性である CM を繰返しながら局所的ではあるものの過剰間隙水圧が初期上載圧に達する評価となった。

一方、CM が反映されない (破壊線の勾配を単に内部摩擦角とした場合) 条件下での有効応力解析や全応力解析による結果は、地表面での入力地震動や地盤変位において異なった応答評価を与えることを確認した。

緩い砂または密な砂の判別には液状化判定が利用でき、設計実務においては、液状化発生予測が軽微であるような地盤

でも適切な設定のもと有効応力解析による検討が必要であることを示した。

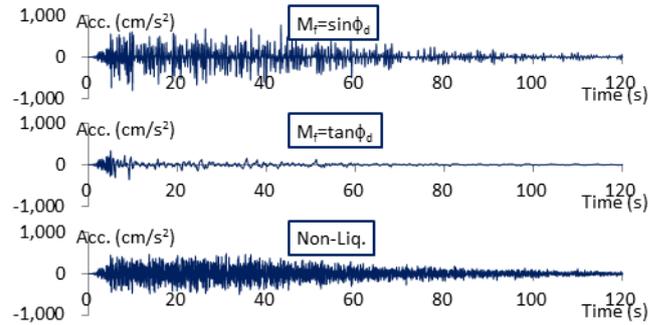


図 5 Onahama GL-0m 加速度時刻歴

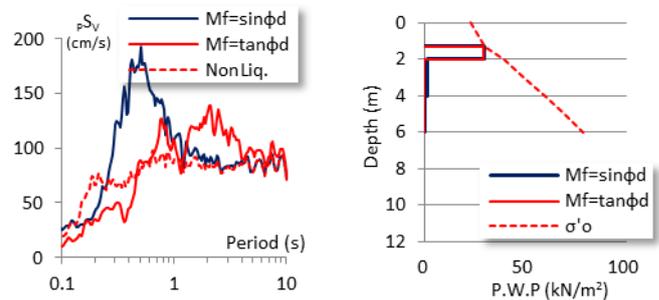


図 6 Onahama 応答スペクトルと過剰間隙水圧

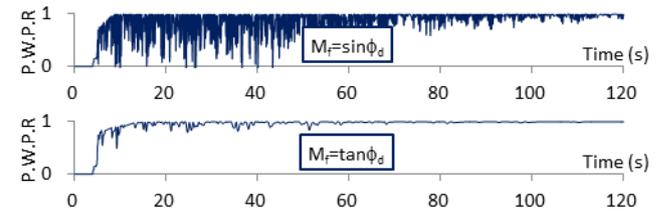


図 7 Onahama GL-1.3m 過剰間隙水圧比時刻歴

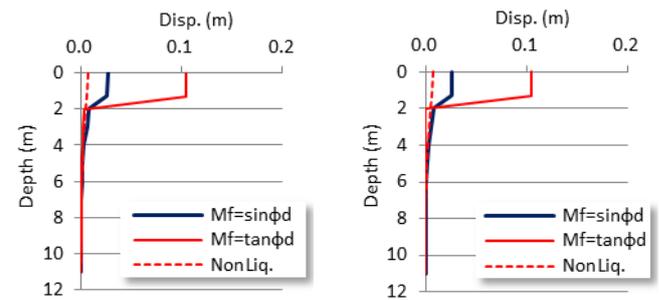


図 8 Onahama 地盤変位 (左=各層最大, 右=GL 最大時)

参考文献

- 1) 山崎久雄ほか: H-D パラメータによる応力-歪モデルを用いた 1 次元有効応力解析(その 3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2016.8
- 2) 古山田耕司ほか: 多地点での原位置採取試料から評価した表層地盤の非線形特性, 第 38 回地盤工学会研究発表会, 2003
- 3) 日本建築学会: 建築基礎構造設計指針, 丸善, 2001
- 4) 国土交通省建築研究所: 改正建築基準法の構造関係規定の技術的背景, ぎょうせい, 2001
- 5) 日本建築学会: 建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計, 丸善, 2006.2
- 6) 港湾空港技術研究所: 港湾地域強震観測, <http://www.eq.pari.go.jp/>

*1 ユニオンシステム(株) 振動解析総合推進室
*2 ユニオンシステム(株) 開発部
*3 大阪大学 大学院工学研究科 博士 (工学)

*1 UNION SYSTEM INC. Dynamic Analysis Research Complex
*2 UNION SYSTEM INC. Development Division
*3 Osaka University Department of Architectural Engineering