

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 緩い砂と密な砂に対する設定法と検証—

正会員 山崎 久雄*1
同 ○ 岩本 裕史*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

筆者らは既報¹⁾で、土の応力-歪モデルに設計実務で多用されている H-D モデル²⁾を用い、液状化パラメータに建築基礎構造設計指針³⁾による液状化判定結果が利用できる実用的な表層地盤の有効応力解析法を提案した。また砂の拘束圧依存性を基準歪み $\gamma_{0.5}$ に集約させる簡便な評価方法を提案し、観測記録との比較により同方法の有効性を報告している¹⁾。

本報(その3)では、さらに表層の砂層が緩い砂または密な砂に応じた有効応力解析条件に着目し、両者の区別を与える設定法⁴⁾もまた液状化判定に用いる補正 N 値 N_a が利用できることを示し、設計実務での地盤の応答解析のさらなる合理化をめざす。

また、表層の砂層が密な砂の場合や液状化の可能性が極めて局所的な場合、有効応力解析による検討が軽視されがちであるが、適切な検討を行わないと設計用スペクトルなどの評価が大きく異なる可能性を示唆する結果が得られたので、これらを中心に次報(その4)で報告する。

2. 有効応力解析法と「緩い砂」「密な砂」の設定法

土の応力-歪モデルは次式の H-D モデルとする。

$$G/G_{\max} = 1/(1+\gamma/\gamma_{0.5}), \quad h = h_{\max}(1-G/G_{\max}) \quad (1a,b)$$

ここに、 G, G_{\max} はせん断剛性と最大せん断剛性、 h, h_{\max} は減衰定数と最大減衰定数、 $\gamma, \gamma_{0.5}$ は歪みと基準歪みである。

有効応力解析における過剰間隙水圧の上昇モデルやサイクリックモビリティ(以下 CM と略す)を含む有効応力経路モデルは社本ら⁵⁾の方法による。詳細は文献を参照されたい。ただし、本提案法はせん断耐力 $\tau_{\max}(\sigma')$ ($=\sigma' \tan \phi_d$, ϕ_d =内部摩擦角, σ' =有効拘束圧)が規定できる H-D モデルを用いるため、CM に直接影響する破壊線の勾配 M_f は、社本らが示した式とは異なり、以下のように簡便な形で与える。

国生ら⁴⁾によると“相対密度が70~80%以上の密な砂では CM が生じ、このとき破壊線の勾配を $\sin \phi_d$ とすれば解析的に CM が近似できる”とある。そこで M_f を次式とする。

$$M_f = \tan \phi_d \text{ (緩い砂)}, \quad M_f = \sin \phi_d \text{ (密な砂)} \quad (2a,b)$$

連続的に分布する砂の相対密度に対して二者択一は不合理のようであるが、本提案法では、液状化判定の $\tau/\sigma'_z = N_a$ 関係式⁶⁾に含まれる相対密度 $D_r (=16\sqrt{N_a})$, N_a =補正 N 値)に着目し、その砂層平均が70%以下を緩い砂、70%超を密な砂として破壊線勾配をそれぞれ式(2)で設定することとする。

M_f 以外の重要な液状化パラメータである液状化抵抗比も液状化判定結果の $\tau/\sigma'_z (=R_{15})$ を用い、他の諸係数は社本らが示した値を用いる。

3. 観測記録との比較

液状化または CM が観測された表1の地震記録および地盤データを用いて、本提案法による解析結果(Cal)を観測記録(Obs)と比較する。ただし式(2)の有効性を確認するため、それぞれ a) $M_f = \tan \phi_d$, b) $M_f = \sin \phi_d$ とした2ケースの解析を行う。また検証地盤毎に示す液状化判定結果も地盤データの公開値より計算したものであり、これらの結果を液状化パラメータに用いた。

表1 検証地震記録

神戸ポートアイランド ⁷⁾	KPI	1995年兵庫県南部地震
東神戸大橋 ⁸⁾⁹⁾	EKB	〃
PARI 釧路 ¹⁰⁾	Kushiro	1993年釧路沖地震
PARI 小名浜 ¹⁰⁾	Onahama	2011年東北地方太平洋沖地震

3.1. 神戸ポートアイランド [KPI]

KPI地盤の平均相対密度は図1より $D_r < 70\%$ であり緩い砂層と判別される。図2, 図3より緩い砂層を反映させた $M_f = \tan \phi_d$ では観測記録との対応は良好であるが、 $M_f = \sin \phi_d$ では不要な CM が現れ記録との対応は不調である。

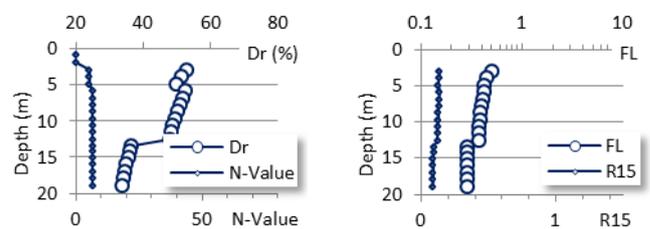
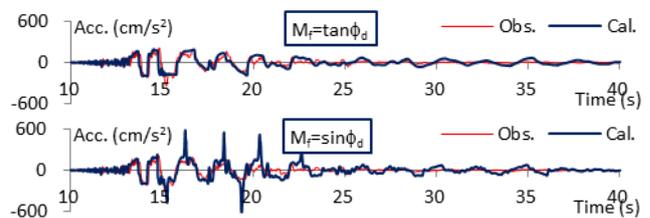
図1 KPI 液状化判定結果 (N 値, D_r , R_{15} , F_L)

図2 KPI GL-0m 加速度時刻歴

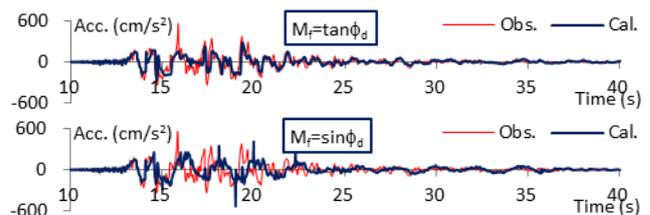


図3 KPI GL-16m 加速度時刻歴

3.2. 東神戸大橋 [EKB]

EKB 地盤の平均相対密度も KPI と同様に図 4 より $D_r < 70\%$ であり緩い砂層と判別される。また計算される応答加速度も図 5 より、KPI と同様に、緩い砂層を反映させた $M_f = \tan\phi_d$ では観測記録との対応は良好であるが、 $M_f = \sin\phi_d$ では不要な CM が現れ記録との対応は不調である。

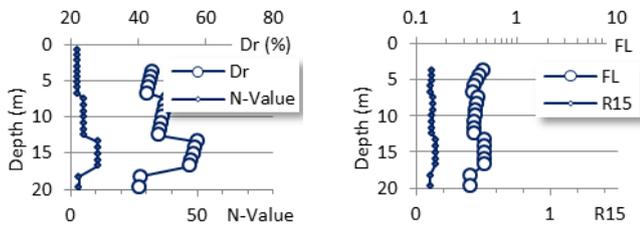


図 4 EKB 液状化判定結果 (N 値, D_r , R_{15} , F_L)

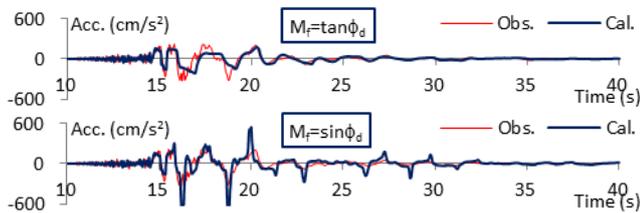


図 5 EKB KPI GL-1.5m 加速度時刻歴

3.3. PARI 釧路 [Kushiro]

Kushiro 地盤の平均相対密度は図 6 より $D_r > 70\%$ であり密な砂層と判別される。応答加速度は、図 7 より密な砂層を反映させた $M_f = \sin\phi_d$ とすることで観測記録との対応が良好であり、 $M_f = \tan\phi_d$ では 35 秒以後も短周期成分が現れて記録との対応は不調である。観測記録では 30 秒以後、長周期化し CM の特徴であるスパイク状の波形が現れており、 $M_f = \sin\phi_d$ とすることでその性状が再現できている。

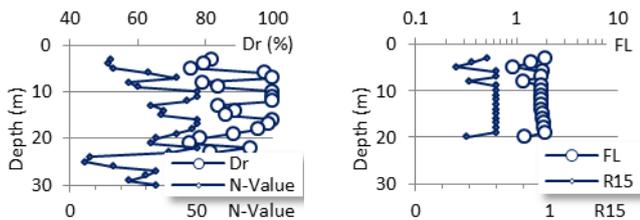


図 6 Kushiro 液状化判定結果 (N 値, D_r , R_{15} , F_L)

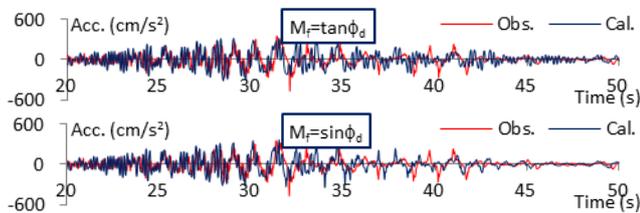


図 7 Kushiro GL-0m 加速度時刻歴

3.4. PARI 小名浜 [Onahama]

Onahama 地盤の平均相対密度も図 8 より $D_r > 70\%$ であり密な砂層と判別される。応答加速度についても、図 9 より、

密な砂層を反映させた $M_f = \sin\phi_d$ とすることで観測記録との対応が良好であり、 $M_f = \tan\phi_d$ では 85 秒以後の振幅が減衰し記録との対応は不調である。Onahama も 85 秒以後でスパイク状の波形が繰り返し現れており、 $M_f = \sin\phi_d$ とすることで、一部の時間で振幅が大きく評価されているもののその性状を再現できている。

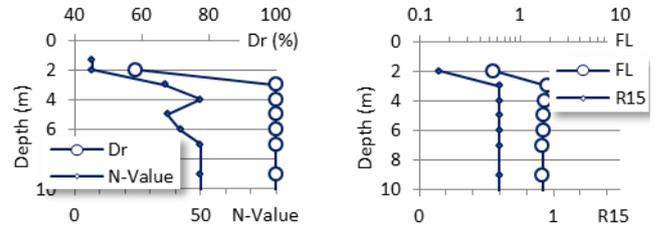


図 8 Onahama 液状化判定結果 (N 値, D_r , R_{15} , F_L)

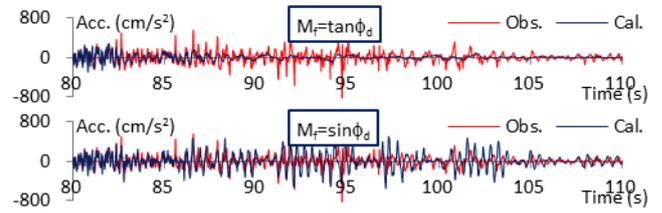


図 9 Onahama GL-0m 加速度時刻歴

4. まとめ

土の応力-歪モデルに H-D モデルを用いた有効応力解析法において、緩い砂と密な砂の特性を反映させるのに、解析パラメータの破壊線勾配 M_f を、 $M_f = \tan\phi_d$ (緩い砂) または $M_f = \sin\phi_d$ (密な砂) とすることの適用性を確認した。観測記録との比較により本設定法で密な砂層で現れる CM も良好に再現できたが、逆に M_f を取り違えると対応は不調となった。

また緩い砂や密な砂の指標となる相対密度 D_r は、液状化判定で用いられる補正 N 値 N_a から $D_r = 16\sqrt{N_a}$ とし、その対象層の平均が、 $D_r \leq 70\%$ では緩い砂、 $D_r > 70\%$ では密な砂と判別することの有効性を 4 例で示した。ただし $D_r \approx 70\%$ 付近での連続性についてはさらに情報を収集し検討したい。

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 1,2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2014.9
- 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) 国生剛治ほか：砂層の液状化現象の数値シミュレーション, 電力中央研究報告 381023, 1982.1
- 5) 社本康広ほか：一次元有効応力解析の実地盤に対する適用性, 日本建築学会構造系論文集 第 433 号, 1992.3
- 6) Kohji Tokimatsu, et al: Empirical Correlation of Soil Liquefaction Based on SPT N-value and Fines Content, Soils and Foundations Vol.23, No.4, 1983.12
- 7) 神戸市開発局：兵庫県南部地震による埋立地地盤変状調査報告書 (ポートアイランド, 六甲アイランド), 1995
- 8) 土木学会：<https://www.pwri.go.jp/caesar/overview/05.html>, 構造物メンテナンス研究センター
- 9) 三輪滋ほか：液状化が生じた地盤のせん断剛性・ひずみレベルの評価と基礎構造の応答評価への適用, 土木学会地震工学論文集 Vol27, 2003.11
- 10) 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