

東海第二発電所 審査資料	
資料番号	PD-2-13 改0
提出年月日	平成29年6月13日

東海第二発電所

有効応力解析における 液状化判定対象層の パラメータ設定について

平成29年6月

日本原子力発電株式会社

1. 概 要

東海第二発電所の有効応力解析には、有効応力解析コード FLIP の安定版 (Ver. 7.3.0_2) を用いる。FLIP の実施に当たっては、これまでに取得されている東海第二発電所の地盤の物性試験データを可能な限り忠実かつ客観的に再現するように設定する。本資料は、FLIP による液状化判定対象層のパラメータ設定について説明する。

2. 液状化パラメータの設定で対象とする保守側の液状化強度特性

同じ地盤で複数の液状化強度試験データがある場合や一組の液状化強度試験データであっても、それがばらついている場合等は、回帰係数 a 、 b の常用片対数の指数関数、

$$R_L(N) = a \times (\log_{10} N)^b \quad (2.1)$$

を用いて、最小二乗法による液状化強度比 $R_L(N)$ の平均的な近似曲線を求める。

各地盤材料の液状化強度試験結果の平均有効主応力 σ'_m に対するせん断応力比 $\tau/\sigma'_m (= R_L)$ と繰返し載荷回数 N の関係のデータが K 個の繰返し載荷回数 N_j ($j=1, 2, \dots, K$) に対応して与えられているものとし、これらの実測値を $R_L(N_j)_{\text{experiment}}$ と表記し、最小二乗法による係数 a 、 b の値が定められた式 (2.1) の液状化強度回帰式の出力を $R_L(N_j)$ と表記すると、各地盤材料の液状化強度特性の標準偏差 σ は次式で求められる。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{K-2} \sum_{j=1}^K \{R_L(N_j) - R_L(N_j)_{\text{experiment}}\}^2} \quad (2.2)$$

式 (2.1)、式 (2.2) より、各地盤材料の液状化強度試験データのばらつきを考慮した保守側の液状化強度近似曲線は、

$$R_L(N)_{-1\sigma} = a \times (\log_{10} N)^b - 1\sigma \quad (2.3)$$

により求められる。そして、式(2.3)の保守側の近似曲線上における繰返し载荷回数 $N = 5$ 回, 10 回, 20 回, 50 回, 100 回, 200 回等に対する液状化強度比 (せん断応力比 τ/σ'_m) の値を対象層のパラメータ設定における再現対象とする。

3. せん断波速度 V_s の深度分布に応じた最小二乗法による回帰式

各地盤材料の V_s の深度分布に応じた σ'_m 依存の回帰式は、回帰係数 A を用いて次式(3.1)で表される。

$$V_s(\sigma'_m) = A \times (\sigma'_m)^{0.25} \quad (3.1)$$

したがって、 V_s の深度分布に対応する初期せん断剛性 $G_m(\sigma'_m)$ と平均有効主応力 σ'_m の関係は、次式で表される。

$$G_m(\sigma'_m) = \rho \times \{A \times (\sigma'_m)^{0.25}\}^2 = \rho \times A^2 \times (\sigma'_m)^{0.5} = B \times (\sigma'_m)^{0.5} \quad (3.2)$$

$$\sigma'_m = \frac{\sigma'_v + \sigma'_h}{2} = \frac{\sigma'_v + K_0 \times \sigma'_v}{2} = \frac{1 + K_0}{2} \cdot \sigma'_v \quad (3.3)$$

$$K_0 = \frac{\nu_{CD}}{1 - \nu_{CD}} \quad (3.4)$$

ここに、 ν_{CD} は各地盤材料の静ポアソン比であり、 σ'_v は有効鉛直方向応力、 σ'_h は有効水平方向応力である。

各地盤調査結果の $V_s \sim \sigma'_m$ 関係データが N 個の平均有効主応力 σ'_{m_i} ($i=1, 2, \dots, N$) に対応して与えられているものとし、これらを $V_s(\sigma'_{m_i})_{investigation}$ と表記し、最小二乗法による式(3.1)のせん断波速度回帰式の出力を $V_s(\sigma'_{m_i})$ と表記する。この時、係数 A は次式が成立する値として定まる。

$$\sum_{i=1}^N \{V_s(\sigma'_m i) - V_s(\sigma'_m i)_{investigation}\}^2 \rightarrow \text{minimum} \quad (3.5)$$

各地盤材料について、以上で求められる係数 A を式 (3.1) に用いれば、せん断波速度 V_s の最小二乗法による回帰式となる。さらに、密度 ρ と係数 A の値を用いれば、各地盤調査結果の $V_s \sim \sigma'_m$ 関係データに対応する $G_m \sim \sigma'_m$ 関係についても、式 (3.2) の係数 B が定まる。

4. 基準平均有効主応力 σ'_{ma} ，基準せん断ひずみ γ_{ma} ，最大履歴減衰率 h_{max} ，基準初期せん断剛性 G_{ma}

FLIP では、各地盤材料に対応するせん断バネの特性（骨格曲線）を表現するモデルとして、次式 (4.1) の形の関数である H-D (Hardin-Drnevich) モデルが適用されている。

$$\tau = \frac{\gamma}{\frac{1}{G_{ma}} + \left| \frac{\gamma}{\tau_{ma}} \right|} \quad (4.1)$$

ここに、 G_{ma} は基準平均有効主応力 σ'_{ma} における微小せん断ひずみでの初期せん断剛性である。また、式 (4.1) の H-D モデルが有する τ_{ma} は、各地盤材料の動的変形特性（割線せん断剛性比 G_s/G_{ma} と履歴減衰率 h のせん断ひずみレベル $|\gamma|$ 依存性試験データ (G_s/G_{ma} ， $h \sim |\gamma|$ 関係試験データ) に最小の誤差で適合した $\tau \sim \gamma$ 関係の骨格曲線における最大せん断応力すなわちせん断強度である。

上式 (4.1) において、 $\gamma_{ma} = \tau_{ma}/G_{ma}$ で定義される基準せん断ひずみ γ_{ma} を用いると、式 (4.1) は次式と同等である。

$$\tau = \left(\frac{G_{ma}}{1 + G_{ma} \cdot |\gamma/\tau_{ma}|} \right) \cdot \gamma \quad (4.2)$$

すなわち、

$$\tau = \left(\frac{G_{ma}}{1 + |\gamma / \gamma_{ma}|} \right) \cdot \gamma \quad (4.3)$$

ここに、 γ_{ma} は H-D モデルを骨格曲線式とした場合の割線せん断剛性 G_s が G_{ma} の (1/2) 倍になる時のせん断ひずみレベルに該当しており、基準平均有効主応力 σ'_{ma} における基準せん断ひずみである。つまり、FLIP ではせん断バネ特性として式(4.3)の H-D モデルの骨格曲線式が適用されていることから、FLIP における割線せん断剛性比 G_s / G_{ma} とせん断ひずみレベル $|\gamma|$ の関係は、次式で表される。

$$\frac{G_s(\gamma)}{G_{ma}} = \frac{1}{1 + |\gamma / \gamma_{ma}|} \quad (4.4)$$

上式(4.4)による $G_s \sim |\gamma|$ 関係曲線は、修正 R-0 モデルと同様に、(γ_{ma} , $G_{ma}/2$) という点を通る。

一方、FLIP では履歴減衰率 h のせん断ひずみレベル依存性、すなわち、 $h \sim |\gamma|$ 関係曲線に次式が適用されている。

$$h(\gamma) = h_{\max} \cdot \frac{|\gamma / \gamma_{ma}|}{1 + |\gamma / \gamma_{ma}|} \quad (4.5)$$

ここに、 h_{\max} はせん断ひずみレベル $|\gamma|$ が無大の時の履歴減衰率、すなわち、履歴減衰率の上限値である。

各地盤材料の G_s / G_{ma} , $h \sim |\gamma|$ 関係試験データが M 個のせん断ひずみレベル $|\gamma_e|_j$ ($j=1, 2, \dots, M$)に対応して与えられているものとし、これらを $G_s(|\gamma_e|_j)_{\text{experiment}} / G_{ma}$, $h(|\gamma_e|_j)_{\text{experiment}}$ と表記し、式(4.4)による割線せん断剛性比のモデルの出力を $G_s(|\gamma_e|_j) / G_{ma}$, 式(4.5)による履歴減衰率のモデルの出力を $h(|\gamma_e|_j)$ と表記する。この時、基準平均有効主応力 σ'_{ma} における式(4.4)の γ_{ma} は次式が成立する基準せん断ひずみの値として定まる。

$$\sum_{j=1}^M \left\{ G_s(|\gamma_e|_j) / G_{ma} - G_s(|\gamma_e|_j)_{\text{experiment}} / G_{ma} \right\}^2 \rightarrow \text{minimum} \quad (4.6)$$

次に、 h_{\max} は、上記の方法で定まった γ_{ma} の値を式 (4.5) に代入した上で、次式が成立する最大履歴減衰率の値として定まる。

$$\sum_{j=1}^M \left\{ h(|\gamma_e|_j) - h(|\gamma_e|_j)_{\text{experiment}} \right\}^2 \rightarrow \text{minimum} \quad (4.7)$$

以上により、FLIP で適用されている履歴モデルに対応した式 (4.4)、式 (4.5) による G_s / G_{ma} 、 $h \sim |\gamma|$ 関係曲線が動的変形試験データを式 (4.6)、式 (4.7) の最小二乗誤差で再現するように基準せん断ひずみ γ_{ma} 、最大履歴減衰率 h_{\max} が定まる。

5. FLIP による保守側の液状化強度特性の再現

FLIP では、液状化判定対象層の粘着力は一律ゼロとして扱われていることから、各液状化判定対象層の初期せん断剛性 G_m の平均有効主応力 σ'_m 依存式は、動的変形特性 (G_s / G_{ma} 、 $h \sim |\gamma|$ 関係) に適合する式 (5.1)、式 (5.2) 及び式 (3.2) で定まる σ'_{ma} 、 G_{ma} の値を式 (5.3) に代入した式となる。ここに、 ϕ_{CD} は各地盤材料の内部摩擦角である。

$$\sigma'_{ma} = \left(\frac{B}{\sin \phi_{CD}} \times \gamma_{ma} \right)^2 \quad (5.1)$$

$$G_{ma} = \frac{B^2}{\sin \phi_{CD}} \times \gamma_{ma} \quad (5.2)$$

$$G_m(\sigma'_m) = G_{ma} \times \left(\frac{\sigma'_m}{\sigma'_{ma}} \right)^{0.5} \quad (5.3)$$

因みに、以上で定まる式 (5.3) が表す 0.5 乗則の $G_m(\sigma'_m) \sim \sigma'_m$ 関係曲線は、各地盤調査結果の $V_s \sim \sigma'_m$ 関係データに適合した式 (3.2) が表す

$G_m(\sigma'_m) \sim \sigma'_m$ 関係曲線と同一であることは自明である。

以上で定まる式(5.3)を用い、FLIPにより対象の式(2.3)に基づく保守側の液状化強度特性を最も小さい残差で再現するようパラメータ ϕ_p , S_1 , w_1 , p_1 , p_2 , c_1 の値が定まる。この時のFLIPによる保守側の液状化強度特性の再現結果を図-5.1～図-5.6に示す。

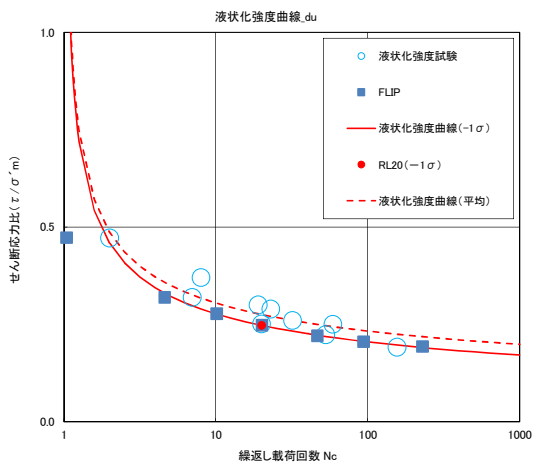


図-5.1 du 層の液状化強度特性

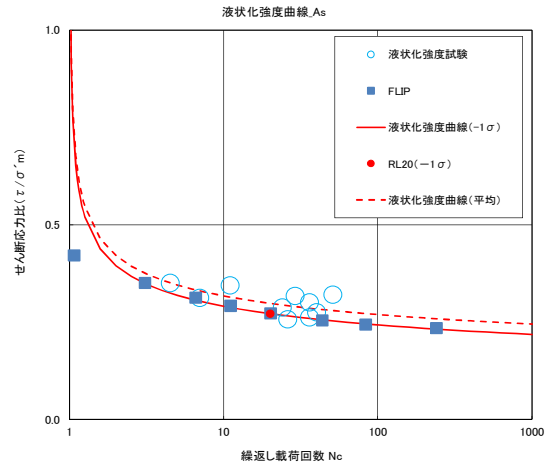


図-5.2 As 層の液状化強度特性

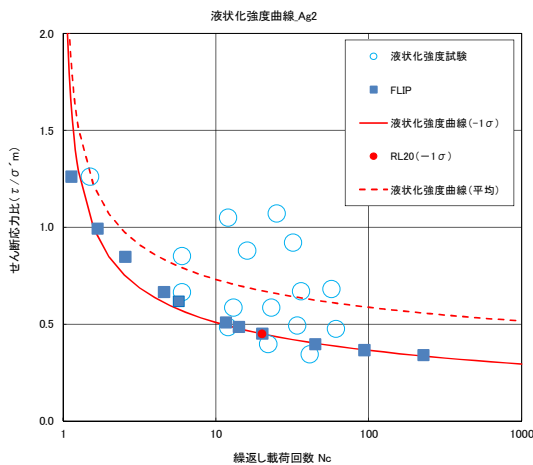


図-5.3 Ag2 層の液状化強度特性

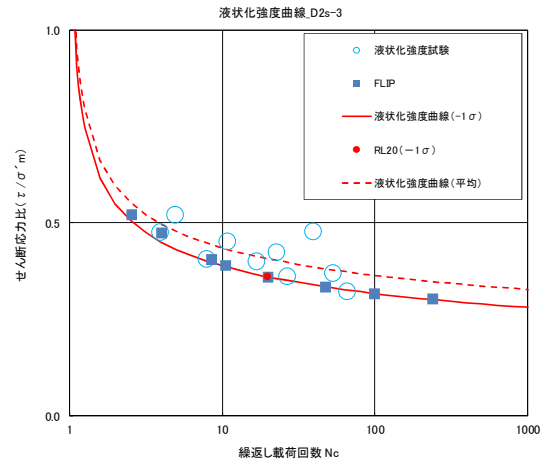


図-5.4 D2s-3 層の液状化強度特性

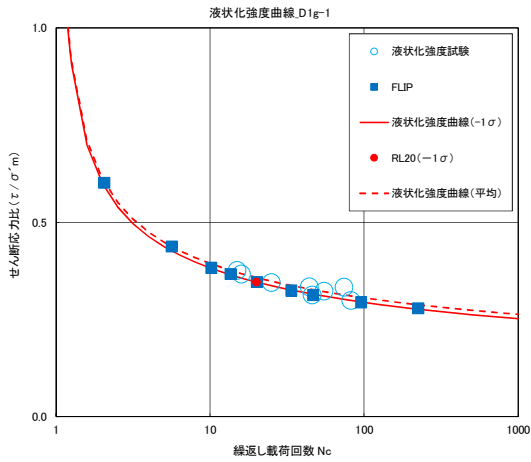


図-5.5 D1g-1層の液状化強度特性

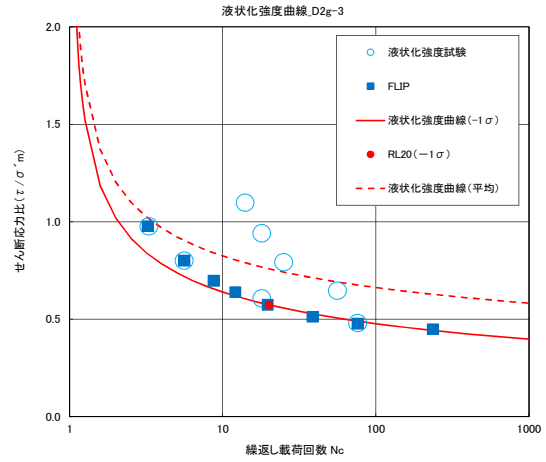


図-5.6 D2g-3層の液状化強度特性

以上により、何れの液状化判定対象層についても、FLIPが全体的な繰返し載荷回数に対して保守側の液状化強度特性の設定となっていることを確認した上で、これらを反映した有効応力解析により、地盤の液状化の可能性を検討し、耐震評価を実施する。