

### 下負荷面モデルによる地震応答解析

パシフィックコンサルタンツ (株) 正会員 〇宮下健一朗  
 固体構造解析ソリューションズ (株) 正会員 橋口公一

#### 1. はじめに

日本の沿岸部では液状化による被災が多数報告されている。2011 の東日本大震災でも多くの範囲で液状化が発生した。液状化解析を対象とした解析コードは多数提案されているが、その中でも下負荷面モデル<sup>1)</sup>は弾塑性解析を基本としたモデルであり、応力負荷経路の影響を考慮することができ、高精度の液状化シミュレートが期待されている。下負荷面モデルはこれまで繰り返しの非排水三軸試験の再現解析において、液状化時特有の現象であるサイクリックモビリティを含め、精度良い結果を残している。しかしながら、入力地震動を用いた実際の地盤を対象にした地震応答解析への適用はまだ行われていなかった。本研究は、下負荷面モデルを用いた水平地盤に対する地震応答解析を行い、下負荷面モデルによる液状化解析の適用性について検討するものである。対象地震動としては 1993 年の釧路沖地震利用した。

#### 2. 下負荷面モデル<sup>1)</sup>

下負荷面モデルは降伏面内における塑性ひずみの発生を考慮できる弾塑性解析モデルである。その概要を以下に示す。以降、降伏面を正規降伏面と示す。

下負荷面モデルでは、正規降伏面内部での応力変化による塑性ひずみ速度の発展を表現するため、現応力点を通して正規降伏面に相似形を有する下負荷面を導入する。正規降伏面と下負荷面の大きさの比を正規降伏比  $R$  とすると、下負荷面は次式で表現することができる。

$$f(\bar{\sigma}, \beta) = RF(H) \quad (1)$$

$$\bar{\sigma} \equiv \sigma - \bar{\alpha} \quad (2)$$

$$\bar{\alpha} = (1 - R)c \quad (3)$$

ここで、 $f(\bar{\sigma}, \beta)$  : 下負荷面 ( $\text{kN/m}^2$ )、 $\sigma$  : Cauchy 応力 ( $\text{kN/m}^2$ )、 $\beta$  : 回転硬化変数 ( $\text{kN/m}^2$ )、 $c$  : 弾性核 ( $\text{kN/m}^2$ )、 $H$  : 等方硬化変数、 $F(H)$  : 降伏面 ( $\text{kN/m}^2$ ) である。式(1)を微分すると以下の式が得られる。

$$\frac{\partial f(\bar{\sigma}, \beta)}{\partial \bar{\sigma}} : d\bar{\sigma} - \frac{\partial f(\bar{\sigma}, \beta)}{\partial \bar{\sigma}} : d\bar{\alpha} + \frac{\partial f(\bar{\sigma}, \beta)}{\partial \beta} : d\beta = dRF + RdF \quad (4)$$

上式を書き換えると、

$$\bar{N} : d\sigma - \bar{N} : \left\{ d\bar{\alpha} + \frac{dF}{F} \bar{\sigma} + \frac{dR}{R} \bar{\sigma} - \frac{1}{RF} \left( \frac{\partial f(\bar{\sigma}, \beta)}{\partial \beta} : d\beta \right) \bar{\sigma} \right\} = 0 \quad (5)$$

$$\bar{N} \equiv \frac{\partial f(\bar{\sigma}, \beta)}{\partial \bar{\sigma}} / \left\| \frac{\partial f(\bar{\sigma}, \beta)}{\partial \bar{\sigma}} \right\| \quad (6)$$

以下の関連流動則を導入する。

$$D^p = \lambda \bar{N} \quad (7)$$

ここに、 $D^p$  : 塑性ひずみ速度、 $\lambda$  : 塑性ひずみ速度の大きさである。

弾性核の移動則及び回転硬化変数の発展則を次式で与える。<sup>1)</sup>

$$dc = \bar{c} \lambda \left( \frac{\bar{\sigma}}{R} - \frac{c}{\chi} \right) + \left( \frac{dF}{F} - \frac{1}{\chi F} \frac{\partial f(c, \beta)}{\partial \beta} : d\beta \right) c \quad (8)$$

$$d\beta \equiv \lambda b \quad (9)$$

ここで、 $\chi, \bar{c}$  : 材料パラメータである。

式(7)~(9)を式(5)に代入し、整理すると次式を得る。

$$\bar{N} : d\sigma - \lambda M^p = 0 \quad (10)$$

$$M^p \equiv \bar{N} : \left\{ \frac{dF}{dHF} h \bar{\sigma} + \frac{U(R)}{R} (\sigma - c) + \bar{c} (1 - R) \left( \frac{\bar{\sigma}}{R} - \frac{c}{\chi} \right) - \frac{1}{RF} \left( \frac{\partial f(\bar{\sigma}, \beta)}{\partial \beta} : b \right) \bar{\sigma} - \frac{1-R}{\chi F} \left( \frac{\partial f(c, \beta)}{\partial \beta} : b \right) c \right\} \quad (11)$$

$$h \equiv \frac{dH}{\lambda} \quad (12)$$

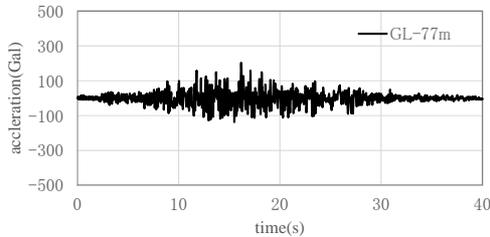
式(10)より  $\lambda$  が得られるので、次式より下負荷面モデルによるひずみ速度を求めることができる。

$$D = E^{-1} : d\sigma + \lambda \bar{N} \quad (13)$$

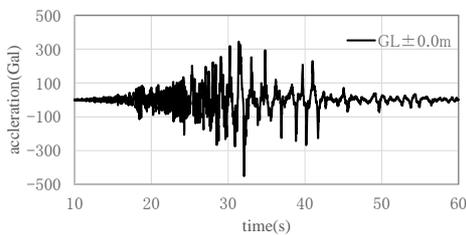
ここで、 $D$  : ひずみ速度、 $E$  : ヤング係数である。

3. シミュレーション結果

下図に港湾強震観測地点である釧路Gで得られた、GL-77mとGL±0.0mの観測波形を示す。このうちGL-77mの観測波形を入力波形として利用し、GL±0.0mにおける波形の再現を検討する。



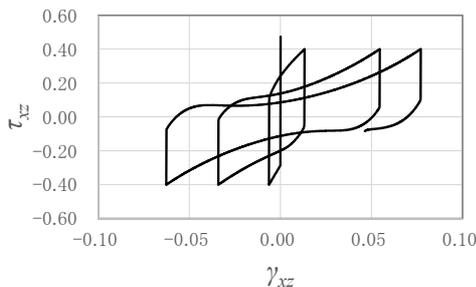
(a)GL-77.0m



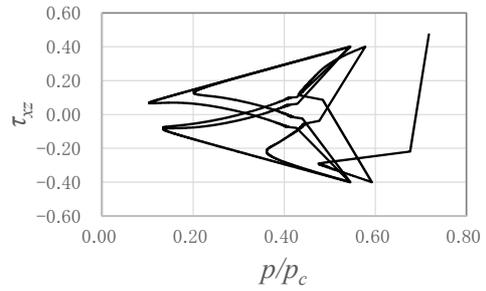
(a)GL0.0m

図-1 観測波形

地震応答解析を行うに先立ち、釧路 G における沖積層を想定して繰り返し単純せん断による要素シミュレーションを行った。結果を図-2 に示す。応力-ひずみ関係はバタフライ型の特徴的な軌跡を示し、下負荷面モデルはサイクリックモビリティをよく表現できていることが分かる。また、応力経路では、偏差応力により徐々に平均有効応力が減少し、その後、ダイレイタインシーによって有効応力が回復するのをよく表現できている。



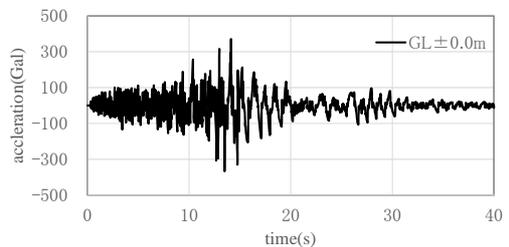
(a)応力-ひずみ関係



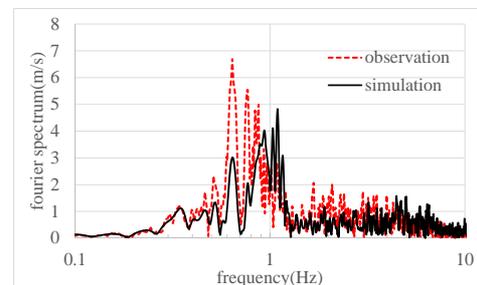
(b)応力経路

図-2 要素シミュレーション結果

地震応答解析におけるシミュレーション結果を下図に示す。得られた加速度時刻歴は最大加速度が発生したのち、徐々に長周期化しており、概ね観測波形GL0.0mの傾向に近い結果を得ている。しかしながら、フーリエスペクトルは観測波形に比べて高周波成分が多く、地盤を硬めに評価していることが分かる。これは、本検討では、地震動発生後の初期段階において発生する塑性体積ひずみが大きかったため、平均有効応力の減少が大きく、これを回避するため降伏面をかなり大きくしているためであり、初期段階における塑性体積ひずみの抑制が今後の課題である。



(a)加速度波形 GL0.0m



(b)フーリエスペクトル

図-3 地震応答解析結果

参考文献

- 1) K. Hashiguchi, "Elastoplasticity Theory", Second Edition, Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics, Springer (2013)