

III-A 91 地震時の液状化に伴うサイクリックモビリティの評価

三井建設技術研究所 正会員 山本陽一 黒島一郎 山口大学工学部 正会員 兵動正幸

1. まえがき 有効応力解析が他の解析法に較べ、その有効性を最も発揮するのが、液状化に伴う大変形領域を含む現象のシミュレーションであることを考えれば、サイクリックモビリティの評価は重要な評価項目である。これまでに、この現象を評価可能な種々のモデルが提案されているが、その評価手法やパラメータの設定において未だ不明瞭な点があるように思われる。本報告では密な砂を対象として繰返し試験結果の表現方法として最も一般的な、繰返し強度曲線を用いたサイクリックモビリティ現象の評価手法について示す。

2. 強度曲線の定式化 図1に繰返し三軸試験から得られた密詰め豊浦標準砂 $D_r=90\%$ の繰返し強度曲線を示した。密な砂の強度線は、繰返し回数の少ないところにおいて顕著な立ち上がりの傾向を示すが、これは正のダイラタンシー特性（膨張性挙動）に起因したものであり、硬化（サイクリックモビリティ）の程度を表している¹⁾。このような場合には、次式に示す双曲線による近似が有効であることが知られている²⁾。

$$R(\tau_{cy}/\sigma'_c)_f = \frac{\alpha}{N} + R_{min} \quad (1)$$

ここで、 R_{min} は $N = \infty$ における液状化強度であり、これ以下の繰返しせん断応力比では、もはや液状化には至らないとする限界値に相当するものである。また、 R_{min} はひずみ振幅の大きさによらず、同一の値で与えられる。 α は、これが大きくなるほど強度線の立ち上がりの程度が大きくなる、曲線の形状を規定するパラメータであり、片振幅軸ひずみ ϵ_{SA} ($=DA/2$) との間次式で与えられる直線関係がある^{1), 2)}。

$$\alpha = C_1 + C_2 \epsilon_{SA} \quad (2)$$

ここで、 C_1, C_2 は回帰に伴う定数である。尚、図1中に描いた曲線は上式により回帰したものである。

3. 応力経路モデル 図2は、サイクリックモビリティ現象を模式的に表したものであるが、この時の挙動は変相線 PTL を境に有効応力が増加する領域 ($b \rightarrow c \rightarrow d, f \rightarrow g$) とせん断応力の折り返しにより減少する領域 ($d \rightarrow e \rightarrow f$) の2つの場合がある。そこで、この時の応力経路を、有効応力の増加領域と減少領域に分けた評価によって定義した。

i) 有効応力の増加領域 今、応力経路が変相線に達した時、これまでのせん断履歴により生じた最大のひずみの大きさが γ_0 であったとする(図3参照)。この時の等ひずみ線は、式(1)で定義される強度線に他ならない。次に、 Δt 秒後にせん断応力 τ が作用するとして、この時のひずみが仮に γ となるに必要な繰返し回数 N_{eq} (等価繰返し回数) は、

$$N_{eq} = \{C_1 + C_2 |\gamma_0| / (1 + \nu)\} / (|\tau / \sigma'_c| - R_{min}) \quad (3)$$

と表せる。せん断応力が増加する過程においてゼロクロス点を超えれば、どの時点で折り返したとしても、前回の折り返し点を基準にすれば、半サイクルのせん断応力波形が作用したものと見なせる。したがって、 Δt 秒後に引き続きせん断応力 τ が作用する時のひずみ γ は、 $N = N_{eq} + 0.5$ として式(1)に代入すれば、

$$|\gamma| = \{ (|\tau / \sigma'_c| - R_{min})(N_{eq} + 0.5) - C_1 \} (1 + \nu) / C_2 \quad (4)$$

と与えられる。さらに、既報^{1), 3)}で定義した有効応力比 $\eta \sim$ ひずみ γ 関係式に、式(4)より与えられるひずみを代入すれば、 τ ($= \tau_0 + \Delta \tau$) が作用する時の有効応力を定めることが可能となる。したがって、各時間ステップ毎に上記の評価を行うことにより、有効応力が回復していく過程の応力経路が定義される。

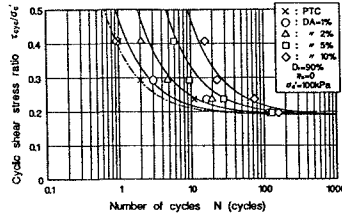


図1 繰返し強度曲線

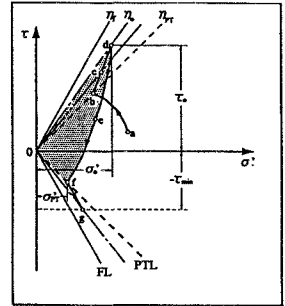


図2 サイクリックモビリティ時の応力経路

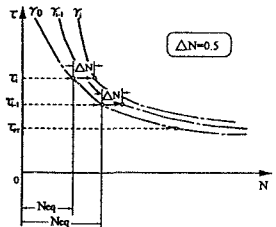


図3 等価繰返し回数 N_{eq} の定義

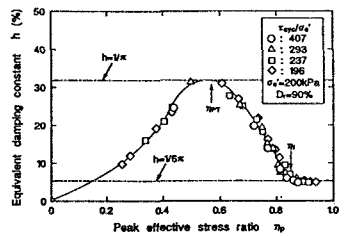


図4 ピーク有効応力比 $\eta_p \sim$ 等価減衰定数の関係

ii) 有効応力の減少領域 サイクリックモビリティ時の有効応力経路は、有効応力の回復と減少を繰り返すが、この時、 $\tau = 0$ のゼロクロス点においてすぐには $\sigma' = 0$ とはならず、徐々に原点に近付いて行く挙動を示す。これに伴い、図2のハッチに示されるような、有効応力減少過程の経路と位相を転じる点の有効応力比とで囲まれるループの面積は、繰返しとともに減少していく。図4は、応力サイクルピーク時の有効応力比 η_p と等価減衰定数 h の関係を示したものである。初期の段階では η_p が大きくなるのに伴い h も増加するが、変相点の有効応力比 η_{PT} を境として、 h は減少傾向に転じることが分かる。したがって、サイクリックモビリティ時には、有効応力経路上のループの面積と減衰定数とが共に減少傾向にあるようである。そこで、有効応力減少領域の応力経路を定義するにあたり、図2のハッチで表される有効応力経路上のループの面積 ΔS と減衰定数 h とが、

$$\Delta S = \pi h \tau_o^2 / |\eta_o| \quad (5)$$

と表される等価な関係があると考えた。ここで、 τ_o 、 η_o はそれぞれ図に示される折り返し点でのせん断応力、有効応力比である。次に、有効応力の減少過程における応力経路(d → e → f)は次式で与えた。

$$\sigma' = \sqrt{(\tau - \tau_o) a} \quad (6)$$

ここで、式(6)を基にして定められる ΔS を、式(5)に代入すれば、定数 a 、 c は、それぞれ次のように与えることができる。

$$a = \frac{3 + \sqrt{3(2\pi h + 1)}}{6\tau_o(1 - \pi h)} \eta_o^2 \quad (7)$$

$$c = \tau_o - a \left(\frac{\tau_o}{\eta_o} \right)^2 \quad (8)$$

ここで、式(7)の右辺の平方根と分母の部分に着目すれば、 $1/6\pi < h < 1/\pi$ の条件が満足されなければならないことが分かる。図4にはこの領域についても示しているが、サイクリックモビリティ時の h はこの領域の範囲内にあることが実験結果からも伺える。したがって、 ΔS に明確な物理的意味はないものの、現象としては上記の考え方が妥当であることを示している。これにより、式(6)に定める有効応力の減少過程における応力経路は、有効応力が増加傾向から減少傾向に転じる折り返し点でのせん断応力 τ_o と有効応力比 η_o 、そして減衰定数 h が与えられれば計算される。ここで、 τ_o 、 η_o については、応力経路の計算過程において必然的に求められるが、 h については上記の条件を満足する次式を与えた。

$$h = \frac{1}{6\pi} + \frac{h_{max} - 1}{6\pi} \left(\frac{\eta_o - \eta_f}{\eta_{PT} - \eta_f} \right)^2 \quad (9)$$

ここで、 η_f は破壊時の有効応力比であり、 h_{max} は最大減衰定数である。上式によれば、変相以降の h は η_o の増加に伴い限りなく $1/6\pi$ に漸近する形で低下していく。

4. 提案モデルの検証 図5に不規則荷重による繰返し三軸試験結果とモデルによる計算結果を比較した。ここで、不規則波形はタフトNS波(1952)を用いこの加速度記録と相似な波形を荷重として載荷している。計算結果は実験結果と良好な対応関係にあるが、特に変相線に達した後の過程において、破壊線に漸近する形で応力回復を繰り返しながら徐々に有効応力が減少していく様子や、応力回復に伴う応力～ひずみ曲線の形状等、サイクリックモビリティ特有の挙動をうまく表現していることが分かる。

【参考文献】1) 山本他：地震時の液状化に伴うサイクリックモビリティを表現可能な一次元有効応力モデル，三井建設技術研究報告，No.20, pp.7～30, 1995. 2) 東他：砂質土の相対密度を考慮した液状化強度曲線の定式化，土木学会第49回年次学術講演会概要集，III, pp.528～529, 1994. 3) 山本他：繰返しせん断を受ける飽和砂の液状化過程における有効応力比～ひずみ関係の評価，第30回土質工学研究発表会発表講演集，pp.797～800, 1994.

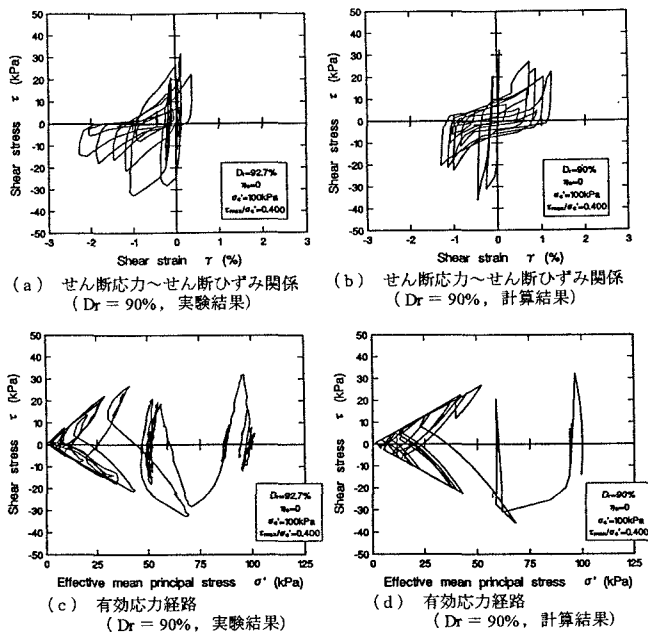


図5 実験結果と計算結果の比較