

東北大学工学部(正)○飛田 善雄

同 上 柳沢 栄司

1. 予えがき 地震時に飽和砂地盤に発生する間けき水圧を精度良く評価する事は地盤工学にとって重要な問題である。従来の簡便手法は、地震加速度の最大値 a_{max} に基づいて地盤に作用する応力 τ_d を決定し、地震の強さに応じて、 τ_d はる片振幅を有する波の数を定め、これと N 値、室内実験等より定まる液状化抵抗応力比 τ_{vo} と比較し、地盤の安全性を検討するものであり、各種構造物の安全性の検討事項の一つになっている¹⁾。この手法は直接的に動的間けき水圧の大きさを与えるものではなく、例えは、液状化に到らないまでも、動的間けき水圧上昇により安定性が低下する斜面等の問題には適用し難い。本報告では、地震波の特性、セン断ひずみの大きさ及び間けき水圧の上昇に伴う地盤の剛性変化を考慮した簡便な動的間けき水圧の予測式を提案する。又、この予測法のもつ物性論的意味について考察し、若干の計算結果を報告する。

2. 簡便な動的間けき水圧の予測法²⁾

本報告の動的間けき水圧の予測法は次の手順で行なう。①：対象とする地震の加速度記録を選定する。②：その記録より、半波長毎の最大値 $a_{max}(i)$ を読みとり、データとする。(図1.) ③：地盤図より対象とする深度の全鉛直応力 σ_{vo} 、有効鉛直応力 σ'_{vo} を決定する。 N 値、間けき比等の情報により、地盤の初期剛性 G_0 を決定する。(但し、 G_0 としては $\rho = 1 \times 10^{-4}$ に相当する剛性を考えている。) ④：(1)式に基づいて $a_{max}(i)$ に対応する地盤内応力 $\tau_d(i)$ を決定する。⑤：(2)式により、発生するセン断ひずみ γ_i を定める。セン断弾性定数 G のひずみ依存性は(3)式で評価する。⑥：発生したセン断ひずみ γ_i より、 K はるパラメータ(損傷パラメータと呼ぶ)を(4)式により求める。⑦：間けき水圧の初期有効鉛直応力に対する比 U^* と k との関係式を(5)式の様に双曲線に近似する。⑧：有効応力の減少に伴う剛性の低下を(6)式で表現する。⑨、次のステップに移り、④～⑧の計算を続ける。間けき水圧比 U^* が(7)式を満足した時、計算をやめ、液状化の可能性が大きいと判断する。

$$\tau_d(i) = \sigma'_{vo} \left\{ \frac{a_{max}(i) \cdot \sigma_{vo}}{8 \cdot \sigma'_{vo}} \right\} \gamma_i \quad (1)$$

g : 重力加速度, γ_i : 低減係数, $\gamma_i = 1 - 0.015 \gamma$

$$G(i) = \frac{G_0(i)}{1 + 10^3 \gamma_i(i-1)} \quad (3)$$

$$G_0(i)/G_0 = \sqrt{(\sigma'_{vo}(i)/\sigma'_{vo})} \quad (6)$$

$$\gamma_i = \frac{1}{G(i)} \tau_d(i) \quad (2)$$

$$K(i) = \exp(\lambda \gamma_i(i) \sum_{j=1}^i \gamma_j) \quad (4)$$

$$U^* = \left(\frac{U}{\sigma'_{vo}} \right) = \frac{\alpha K}{K + \beta} \quad (5)$$

$$\tau_d(i)/\sigma'_{vo}(i) \geq \tan \phi_0 \quad (7)$$

ここに ϕ_0 は低拘束圧時の変相線に相当する内部摩擦角である。上記計算方法において、計算されたセン断ひずみが 10^{-4} 以下である時には、これを無視する。これは $\rho = 10^{-4}$ 以下では、間けき水圧の上昇をもたず可変のタイランシーが生じない弾性的変形領域であることを考慮したものである。又、(7)式で液状化の可能性を判断するのは、(7)式を満足すると、通常 1~2 波で液状化に至るからである。別の観点からいうと、①~④のステップによる計算は(7)式を満足した後の変形特性は表現できないからである。液状化後の変形特性は別途検討する必要がある。上記手法では、物性定数として、 λ , α , β , G_0 , ϕ_0 の5つがあるが、このうち、 λ , α はほぼ定数とみなして良く、計算では $\lambda = 5.0$, $\alpha = 1.0$ としている。又、 ϕ_0 は他の定数と比較して、その変化は小さく、最終結果にはそれ程大きな影響を与えない。 β は他者の解析結果と比較すると $\beta = 0.2$ が最も他報告との一致性が良い。 G_0 の決定は本報告では、又々地盤を考へ、 $G_0 = 0.9 G_{max}$ として計算したが、 G_0 は対象地盤に与えるひずみ履歴：例えは、過去に液状化を受けている等、を反映するものと考えられる。実験で観察される液状化ポテンシャルのひずみ履歴依存性^{3), 4)} は、この予測法では G_0 及び β に反映されるものと思われる。以上の物性定数の物性論的議論は文献2)に詳しく検討されており、 β はタイランシー比(タイランシーをセン断ひずみに対する比 $d\gamma/d\epsilon$)と密接な関係をもっている。尚(4)式、(5)式は、Finn の報告⁵⁾に基づき、簡略化したものである。

3. スカラー量に基礎を置く動的間げき水圧の予測

①～④による動的間げき水圧の予測は水平地盤を対象としたものである。この手法を2次元あるいは3次元に拡張する時、(4)式に於ける γ は $\xi = \frac{1}{2} \epsilon_{ij} \epsilon_{ij}$, $\epsilon_{ij} = \epsilon_{ij} - \frac{1}{3} \epsilon_{kk} \delta_{ij}$, $\epsilon_{kk} = \text{tr}(\epsilon_{ij})$, に置きかえられる。この様に動的間げき水圧の予測がスカラー量(不変量)で行われる理由は次の様に考えられる。「砂は本来、等方的硬化を示すものではなく、あるひずみ履歴(応力履歴)により生ずる硬化は、極めて限られたものであり、ひずみ空間(応力空間)内の一部にすぎず、その硬化特性を定式化する事は難しい。故に地震時の様に応力回転、主応力軸の回転を生ずる様な場合、弾性的変形、塑性的変形を区別する事はなく、時々刻々発生するひずみを何らかのスカラー量(例えば、ひずみテンソルの不変量, $\xi = \int_{t_0}^t d\xi$, あるいは仕事量 $W = \int_{t_0}^t \sigma_{ij} d\epsilon_{ij}$)に置きかえて、その量の初期状態からある時刻 t までの長さで間げき水圧の発生量を関係づける事が工学的に有用である。」

勿論、2次元以上の問題を論ずる場合、初期状態: 静的中心力等、の差により ξ と u^k の関係が異なる事になる。種々の静的応力状態の基での $u^k = f(\xi)$ を実験により求めておく事が必要である。このような弾性的変形も間げき水圧の上昇に寄与するという考え方は、過大に間げき水圧を予測する事になるが、計算としては、危険側の結果を与える事になり、許容できる考え方と思われる。

4. 計算結果

図2は De Alba らの実験結果⁶⁾との比較である。 β を種々変化させ、間げき水圧比と正規化された繰返し回数 N/N_1 の関係を比較した。計算結果は液状化直前を除いて実験結果の範囲内に収まり、仮定した関係式(5)の妥当性が示された。図3は有効応力法に基づく石原らの解析結果⁷⁾との比較であるが、良い一致がみられる。他報告との比較も満足すべきものであり、本手法の妥当性が示される。²⁾

5. あとがき 地震波の特性を考慮できる様な動的間げき水圧の簡単な予測手法について記した。現在までの本手法に基づく計算結果は満足すべきものであるが、今後、液状化非液状化地盤のケーススタディを通してその適用性を論ずる必要がある。本手法を地盤の応答解析に用いる場合、1) 先ず応答特性を求め、各深度のひずみ履歴を求め、その時刻歴により発生間げき水圧量を予測する、いわゆる全応力法と2) 発生する間げき水圧の効果を時々刻々取り入れる有効応力法の2つが考えられるが、本手法は、その両者に適用可能である。本手法を今後、2次元問題等に適用する長めには、 $u^k = f(\xi)$ 関係の種々の初期状態について求める事が必要である。又、2次元問題には、力学的力と浸透力の連成などの様々取り扱うかという問題がある。液状化後の変形特性も今後の課題である。

6. 参考文献

1. 吉見吉明著「砂地盤の液状化」技報堂
2. Y. Tobita & E. Yanagisawa (1982), 7th 地震工学シンポジウム, PP.601~608
3. Nemat Nasser & Y. Tobita (1982), Mechanics of Materials, Vol.1 No.1, P.43~
4. Ishihara K. (1978) Proceedings of U.S.-Japan Seminar on Granular Mech. Sendai.
5. W.D. Finn & S.K. Bhatia (1981), 10th ICSMFE Vol.1 P.201~
- 6) P.D. Alba et al (1976), ASCE Vol.102, GT9, P.909~
- 7) K. Ishihara & I. Towhata (1980) J. of Faculty of Engrg. Tokyo Univ. Vol. 22, B-2, P.49~

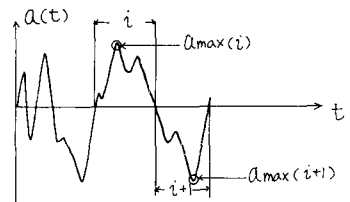


図1. $A_{max}(i)$ の求め方

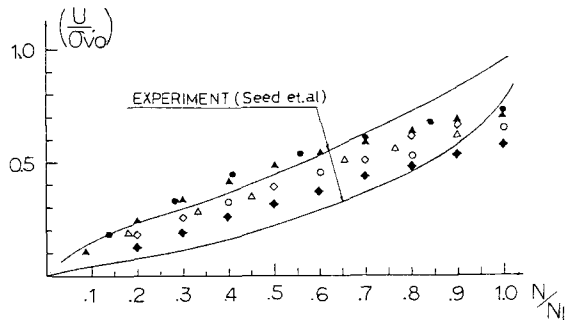


図2. 間げき水圧比と正規化された繰返し回数 N/N_1 の関係⁶⁾

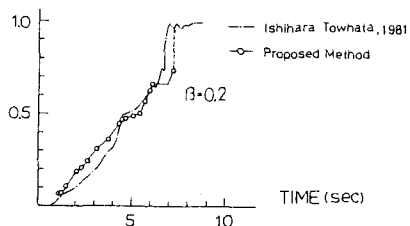


図3. 石原らによる計算結果との比較⁷⁾