

液状化を考慮した地震時水中無限斜面の安定解析に対する一考察

澤田 知之*・能町 純雄**

A Note on Seismic Stability of a Submarine Infinite Slope Considering Liquefaction

Tomoyuki SAWADA and Sumio G. NOMACHI

要 旨

非排水状態での土構造物の液状化に対する基本的考察を無限斜面を取り上げて行ったものです。べり変位の評価が必要ないという例についての報告である。

Abstract

During the short duration of earthquake shaking, an essentially undrained condition is assumed in many earth structures.

During cyclic loading in Cohesionless Soils, then, the pore pressure may even rise to a value equal to the total confining pressure.

In such cases, the effective confining pressure in the Soil becomes zero, and the soil loses its resistance to shear deformation completely. This soil is then said to have liquefied.

1. ま え が き

地震時の慣性力は斜面の破壊面のすべりを引き起こすが、水中斜面におけるこの影響はすべり破壊面その累積変位によって評価されるべきであると考えられる。1965年ニューマーク⁽¹⁾が地震時堤体の移動変位を解析して安定評価を行ったが本研究でもこの理論を用い水中無限斜面の液状化を考慮して地震時における大陸棚などの水中無限斜面の安定解析について考察を行うものである。このニューマークの解析手法における水中斜面の限界地震支持力⁽²⁾や地震時すべり変位^{(3),(4)}については既に発表済みであるので今回は液状化に主眼を置いて考察を行うものであり、基本的解析として水中無限斜面を取り上げて考察を進める。

地震主要動の際、斜面等土の構造物は周期的载荷状態となりこれは間隙水圧の動的影響により剪断抵抗を減少させる。この時、土は非排水状態と仮定され周期的な载荷状態でのこの過剰間隙水圧による有効応力の減少は粘性土又は粘着力のない土いずれかの非排水剪断抵抗の低下の原因となる。粘着力のない土におけるこの周期的载荷状態では間隙水圧は全限界応力に等しくなるまでに達する。そうした時、有効限界応力はゼロとなり土は剪断抵抗を失い剪断変形を引き起こす。この土の状態を液状化と定義する訳である。このように考えると斜面に起きる液状化は地震の一回一回の周期的繰返し载荷ごとに破壊面の位置が変化することとなり破壊面のすべり変位は液状化を考慮する時としない時では全く様子を異にすることとなる。

つまり、地震時斜面の安定解析は単に慣性力を考慮するだけでなく周期载荷による土の応力低下を考える必要があると言える。

* 土木工学科 助教授

** 北海道大学 名誉教授

確かに、さほど間隙水圧が生じない状態の土や地震動に対して著しい応力低下を生じない土、たとえば粘性土、乾燥砂および密度の高い飽和砂などは地震動に対して変形しにくくニューマークの解析法で充分対応できると考えられる。しかしながら、飽和した密度の低い粘着力の小さな土で作られ斜面が地震動を受ける際は間隙水圧が増大し抵抗応力が激減してすべりが発生することとなる。本論ではこのような密でない土での液状化斜面の安定について考察するものであるが粘性土の動的な影響については論議を行っていない。

2. 水中斜面の液状化の考察

次に地震による斜面土塊の応力の周期的変化を考察する。シード等⁽⁵⁾が1969年に一般的な土の液状化についての検討を提案しているが、本稿ではこれを水中斜面に適用させて述べるものである。

2-1 地震前及び地震時の応力の評価

a) 色々な振幅に適当な重みをつけて地震の慣性力はこれと等価のサイクル数 N と等価な地震係数 K_{av} とで表わされる。

b) すべり面を仮定し極限解析を行う際、地震前の初期垂直応力 σ_{fc} と剪断応力 τ_{fc} は分割法の極限つり合い法により求められる。

c) 各々の分割要素の重心に慣性力を考慮して再度極限つり合い法を用いて1サイクル毎の地震載荷後の垂直応力 σ_{2fc} と剪断応力 τ_{fc} の計算を行う。

2-2 液状化ポテンシャルの評価

a) 斜面破壊を引き起こすのに必要なサイクル応力の回数 Nn を地震前に τ_{fc}/σ_{fc} の条件下で初期圧密された周期載荷試験で求められる。これらの結果は初期の応力比 τ_{fc}/σ_{fc} とは異なった関係を示す。つまり地震時における破壊面に作用する垂直応力 σ_{fc} と破壊面を引き起こす Nn サイクル目の重ね合わされた剪断応力の関係を示すこととなる。もし載荷の全サイクル数が10であれば、 Nn は2, 4, 6, 8又は10が適応応力に対して用いることができる。

b) 前述の関係から Nn サイクルにおける限界すべり面に沿った点で、すべり破壊を起こす重ね合わされた剪断力は地震時はその同じすべり面上で決定され比較することができる。破壊は液状化に必要な剪断応力より大きな剪断応力が生じた点で突然に液状化を呈して発生する為に、この仮定した各々の破壊面での全剪断抵抗を計算するとよい。次に、この破壊面での限界加速度を求め、その最小のものが生じる破壊面が斜面破壊を支配するのである。そうして水中斜面の地震時の累積変位をニューマーク法で求めるのである。

3. 水中無限斜面

図-1には静水圧下の水中斜面を示す。この斜面上又は浸透している水は土中を流れず停滞状態（流体

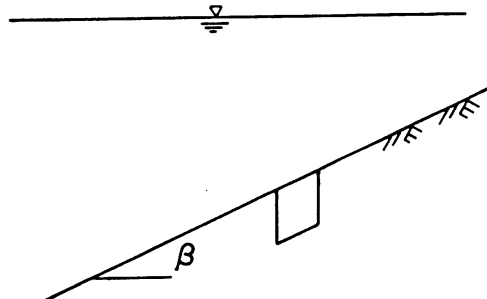


図-1 静水圧下の水中無限斜面

静力学上のつり合い状態)とする。斜面は無限長、無限幅とし応力は断面鉛直方向にのみ作用すると仮定する。また、均質・等方性斜面とする。よって同水深面上の垂直応力は等しいことになる。

極限解析による破壊面及び単位長さ当たりのすべり土塊の解析モデル図を図-2に示す。

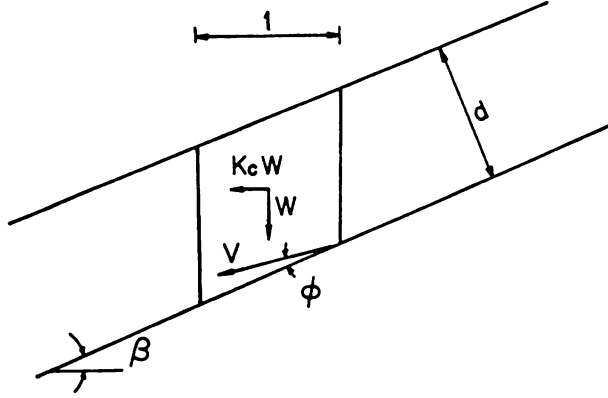


図-2 無限斜面解析モデル

一般に解析土塊には3方向に応力が存在するが、無限斜面では、2垂直面で等しくつり合ってしまうので、基盤に対する土の自重とその慣性力のみを考えるとよい。図-2よりすべり破壊面に作用する初期有効鉛直応力 σ_{fc} と剪断応力 τ_{fc} は次のように示される。

$$\sigma_{fc} = \frac{W' \cos \beta}{1/\cos \beta} = \frac{(\gamma' \frac{d}{\cos \beta} - 1) \cos \beta}{1/\cos \beta} = \gamma' d \cos \beta \quad (1)$$

$$\tau_{fc} = \frac{W' \sin \beta}{1/\cos \beta} = \frac{(\gamma' \frac{d}{\cos \beta} - 1) \sin \beta}{1/\cos \beta} = \gamma' d \sin \beta \quad (2)$$

ここで、 $\gamma' =$ 水中土の単位体積重量

同様に本質的には同じな地震の再動による有効鉛直応力と剪断応力は図-2より次のように各々示される。

$$\sigma_{fe} = \frac{W' \cos \beta - K_{av} W \sin \beta}{1/\cos \beta} = \gamma' d \cos \beta - K_{av} \gamma d \sin \beta \quad (3)$$

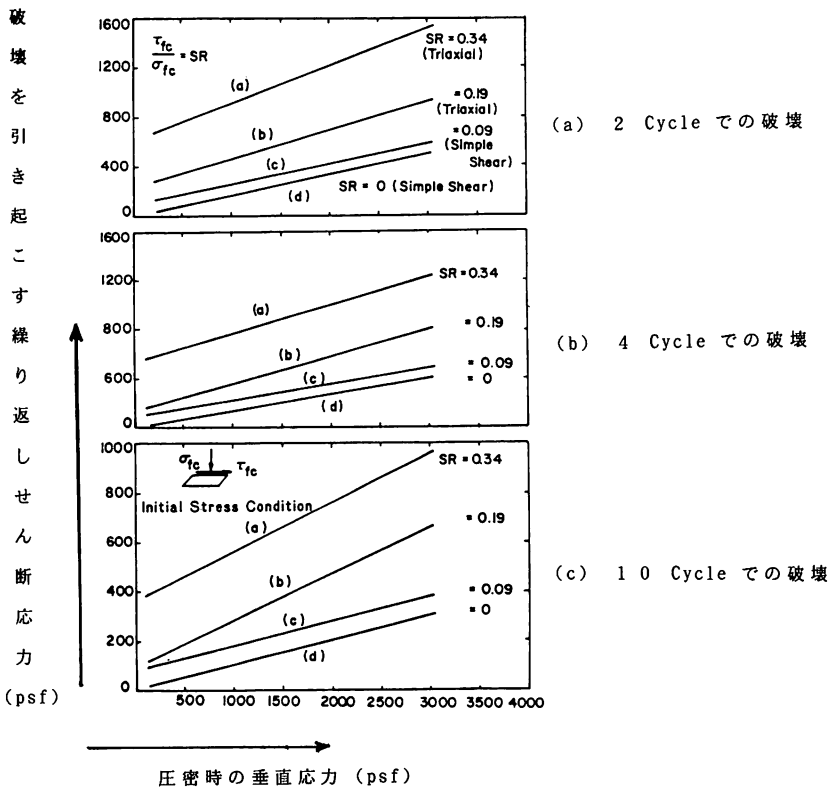
$$\tau_{fe} = \frac{W' \sin \beta + K_{av} W \cos \beta}{1/\cos \beta} = \gamma' d \sin \beta + K_{av} \gamma d \cos \beta \quad (4)$$

ここで、 $\gamma =$ 土の全単位体積重量

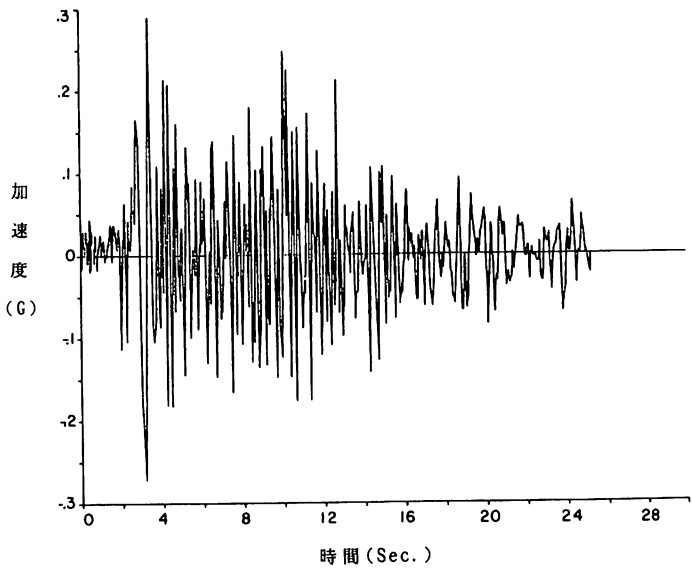
4. 結果及び考察

液状化評価の為まず野外と同条件の同圧密、同浸透水状態、同応力状態で土を採取し、その試料によるサイクル(繰り返し)載荷実験を行う必要がある。ここに、シード等⁽⁵⁾が行ったシェーフィールドダムの沈泥砂の例を図-3に示し考察を進める。(使用地震波形: 図4) この実験は τ_{fc}/σ_{fc} の色々な値に対して剪断試験と三軸圧縮試験をサイクリックに行ったもので0から0.34まで行っている。一連の三軸圧縮試験において試料は主応力比の範囲で初期圧密状態となり野外と同じ状態を呈する。色々なサイクル(繰り返し)載荷に対して液状化を起こし破壊する設計サイクルが図-3(a)(b)より示される。

一連の単純剪断サイクル(繰り返し)試験からは野外と同様にある初期剪断応力 τ_{fc} と有効鉛直応力 σ_{fc} の比 τ_{fc}/σ_{fc} が初期圧密となる。よって試料は液状化を引き起こす繰り返し応力と繰り返し数との関係を決める為の比排水状態下での繰り返し剪断力に支配されることになる。これは液状化による破壊面に



図一 3 繰り返し剪断応力による初期圧密応力の影響 (Seed et al, 1969)



図一 4 設計地震の加速時刻歴

おける鉛直応力と繰り返し剪断力の関係を明らかにすることとなる。これは図-3の(c)(d)より与えられる。三軸圧縮試験は静的荷重時の初期応力が大きい場合、斜面の破壊面に沿った解析要素の地震時解析には比較的妥当なものと言える。一方、初期応力が小さい場合は地震時載荷における解析は単純剪断試験がよいデータを与えていると考えられる。つまり式(1)(2)から求められる初期応力と(3)から求められる鉛直応力の図-3との対応により破壊したり液状化を呈するという判断を行う。

この図の結果からは破壊を起こす重ね合わせの剪断力は2, 4及び10サイクル目である。又、応力の繰り返しから考えると、地震時のいかなる重ね合わせの剪断力も液状化となる時は、この図の値をうわまわる値を示すこととなる。無限斜面について言うならば、剪断応力は破壊面上ですべて等しい為、評価はどこか1点で行えばよいこととなる。

よって、図-1 ($\beta = 44.5^\circ$) のような斜面に対して応力の繰り返し数と限界地震加速度係数を既発表解析法⁽³⁾⁽⁴⁾で計算すると無限斜面は局部斜面と異なりすべて、地震荷重の作用前に破壊するという結果を得た。そこで、傾斜角 β を 44.5° から 15.5° と変えて計算を行うと(図-5)7サイクル目の載荷で液状化を呈する結果を得た。今後も数多くの計算例及び模型実験で検討を要すると考えられる。

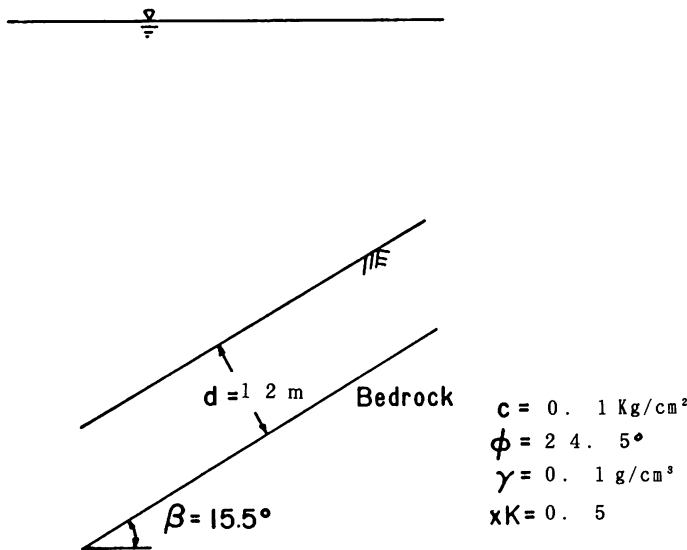


図-5 計算例

参考文献

- (1) Newmark, N. W., "Effect of Earthquakes on Dams and Embankments", The Fifth Rankine Lecture of the British Geotechnical Society, Geotechnique, England, Vol. XV, No. 2, 1965, pp. 137-160.
- (2) 能町・澤田・松岡, "擬静的解析による斜面上基礎の地震時支持力", 構造工学論文集, Vol. 31 A, 1985, pp. 503-508.
- (3) Sawada, T., Nomachi, S. G and Chen, W. F., "On Slope Displacement by a Lagarithmic Spiral Failure Slide During Earthquake", Proceedings of The Sixth International Symposium on Landslides, New Zealand, 1192, pp. 1193-1198.
- (4) Sawada, T., Chen, W. F. and Nomachi, S. G., "Model Test and Analysis for Seismic Displacement of a Mounded Foundation Near a Down-Hill Slope", International Symposium on Soil Improvement and Pile Foundation, China (南京), Vol. I 1992, pp. 316-321.
- (5) Seed, H. B., Lee, K. L. and Idriss, I. M., "Analysis of the Sheffield Dam Failure", Journal of SMFD, ASCE, Vol. 95, No. SM6, November 1969, pp. 1453-1490.

(平成4年11月27日受理)

