

液状化による緩傾斜斜面の流動量の簡易算定法

森尾 敏¹・日下部伸²・柳原純夫³

¹正会員 工博 ㈱奥村組 情報システム室 (〒545-8555 大阪市阿倍野区松崎町 2-2-2)

²正会員 工博 ㈱奥村組 技術研究所 (〒300-2612 茨城県つくば市大砂 387)

³正会員 ㈱奥村組 土木部 (〒545-8555 大阪市阿倍野区松崎町 2-2-2)

本研究は、液状化による緩傾斜斜面の流動量の簡易算定法について検討したものである。表層地盤と基盤層が同じ勾配で緩やかに傾斜した斜面の流動を一次元問題としてとらえ、有効応力に基づく既往の二次元液状化解析コードを用いて、流動量を簡易に算定する手法を提案する。この手法は、基盤層の傾斜によるわずかな初期せん断応力の存在が地盤流動の要因と考えたものである。

提案した手法を Orense の解析例および既往地震による事例と比較することにより、本手法の適用性について検討している。

Key Words : liquefaction, liquefaction induced flow, simplified procedure, one dimensional FEM analysis, initial shear stress

1. まえがき

液状化に伴う地盤の流動量の解析法については、地盤を固体ととらえる考え方^{1), 2)}, あるいは流体としてとらえる考え方³⁾を含めて数多くの手法が提案されている。これらの手法は、液状化後の地盤をどうとらえるかに違いがみられるものの、すべて、地盤の流動量を評価する専用の解析手法といえる。しかし、傾斜地盤の流動が、土の有効応力の低下に伴う強度および剛性低下に起因するものであるなら、現在広く普及しつつある有効応力に基づく液状化解析法を用いた流動量算定法の適用性を検討しておくことは、重要であろう。

本研究では、基盤層が緩やかに傾斜した無限斜面の流動を一次元問題としてとらえ、有効応力に基づく既往の二次元液状化解析コードを用いて、流動量を簡易に算定する手法を提案する。この手法は、基盤層の傾斜によるわずかな初期せん断応力の存在が地盤流動の要因と考えたものである。本手法を Orense の解析例⁴⁾および既往地震による流動事例⁵⁾と比較することにより、本手法の適用性について検討する。

プリ・ポストプロセッサを含めた解析ツールがかなり進歩しているといえ、有効応力に基づく二次元液状化解析はやはり大変な作業である。特に、地盤流動は広範囲で生じるため、解析には広範囲な領

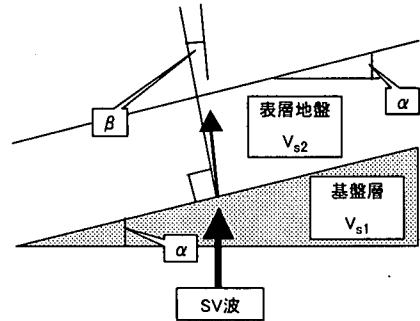


図-1 2層構造傾斜地盤の解析モデル

域のモデル化が必要である。本研究で提案する簡易な一次元解析結果は、流動量の上限值と位置付けることも可能であり、二次元液状化解析における流動量のめどを立てることができ、有用であろう。また、本手法は地盤の弾塑性的挙動から流動に至るまでの経過を一貫して評価できるという利点がある。

2. 解析方法

(1) 解析モデルの作成法

図-1 に示すように、地表面と基盤層が同じ角度 α で傾斜した2層構造地盤の鉛直下方から地震波 (SV波) が入射する問題を考える。表層地盤への透過波の角度を β とすれば、次式が成立する。

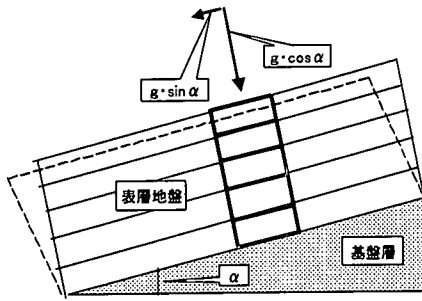


図-2 解析モデルにおける初期応力の設定

$$\sin \beta = \sin \alpha \cdot V_{s2} / V_{s1} \quad (1)$$

ここに、 V_{s2} は表層地盤の S 波速度、 V_{s1} は基盤層の S 波速度である。通常、 $V_{s2} < V_{s1}$ であるため $\beta < \alpha$ が成り立つ。表層地盤の V_{s2} が液状化により大きく低下する場合は、式(1)の右辺はほぼゼロとみなすことができる。この結果、 $\beta = 0$ が成立し、 S 波波動は基盤層の傾斜面に垂直方向に伝播する。このことは、図-2 に示すように基盤層の傾斜面に垂直な 1 次元 FEM モデルの単純せん断変形モードで表層地盤の S 波による応答が表現できることを意味する。

FEM 各要素の初期応力については、 α 傾けた図-2 のモデルに $g \cdot \cos \alpha$ の鉛直方向加速度と $g \cdot \sin \alpha$ の水平方向加速度を作用させることによって近似する。ここに、 g は重力加速度であり、想定する変形モードを図中に破線で示す。この結果、FEM 各要素にわずかな初期せん断応力が生じる。初期応力解析の境界条件は、同レベルの節点の水平方向および鉛直方向変位がそれぞれ等しいとする多点拘束条件 (MPC: multi point constrain) により表現する。この条件は地震応答解析 (液状化解析) 時の境界条件と同じものである。

入力地震動については、 $u_g(t)$ を基盤層上面における水平方向地中振幅とすれば、 $u_g(t) \cdot \cos \alpha$ の水平動と $u_g(t) \cdot \sin \alpha$ の鉛直動を同時に作用させる。ただし、傾斜勾配 α が小さい場合は鉛直動の影響も小さいため、省略することができる。SV 波が傾斜基盤面に垂直に入射することにより、境界面で SP 変換波が発生するが、この影響も無視できるものと考えられる。

(2) 液状化解析法

本研究では、FEM 解析に有効応力に基づく液状化解析プログラム FLIP⁶⁾を用いる。本プログラムで用いられる構成式は、いわゆる全ひずみ型のモデルで、せん断挙動と体積ひずみ挙動が分離されたものである。せん断に関しては、多重せん断バネモデルが用いられ、主応力軸の回転も含めた任意方向のせん断

の評価が可能である。個々のせん断バネには双曲線モデルが、この履歴特性には修正した Masing 則が適用される。修正した Masing 則とは、せん断ひずみ振幅に応じて履歴ループの大きさ (減衰定数) を調整したものである¹⁰⁾。体積ひずみに関しては、せん断仕事モデルが用いられる。塑性せん断仕事 W_s と一般化したせん断応力 τ に基づいて液状化フロント S_0 と状態変数 S を定め、この状態変数 S から塑性体積ひずみを決定している。

初期応力を含んだ運動方程式を用いていれば、液状化解析に他のプログラムを使用することも可能である。対称性を有するヒステリシスループを描く弾塑性構成式を用いる限り、初期せん断の方向に残留ひずみが累積され、残留変形が生じる。ただし、現実に観測される数 m の流動変形を表現するには、有効応力がゼロに接近した後の数%あるいは数十%に至る大きなせん断ひずみを安定的に表現できる工夫が必要である。一般には、塑性偏差ひずみ増分の 2 次不変量の累積値を用いて、指数関数により硬化係数を低減させる方法が用いられている。LIQCA⁷⁾、NAFSS⁸⁾、STADAS⁹⁾等がこの範疇に入る。

一方、FLIP では液状化の進行 (すなわち、 S_0 の減少) に伴って、双曲線モデルのせん断強度 τ_0 、せん断弾性係数 G_0 、基準ひずみ γ_0 を次式により与える。

$S_0 > 0.4$ のとき:

$$\tau_0 = \tau_{ns1} S, G_0 = \tau_0 / \gamma_{ns1} \quad (2)$$

$S_0 < 0.4$ のとき:

$$\tau_0 = \tau_{ns1} S + \Delta \tau_0, G_0 = \tau_0 / \gamma_0 \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{ここに、} \Delta \tau_0 &= \Delta r_0 \sigma'_{ns1} \\ \Delta r_0 &= (m_1 - m_2) (0.4 - S_0) \\ \gamma_0 &= \gamma_{ns1} / (S_0 / 0.4) \end{aligned}$$

ただし、 τ_{ns1} 、 γ_{ns1} は、 τ_0 、 γ_0 の初期値、 σ'_{ns1} は初期有効拘束圧、 $m_1 = \sin \phi_r$ 、 $m_2 = \sin \phi_0$ 、 ϕ_r は破壊時の内部摩擦角、 ϕ_0 は変相角である。上式は、双曲線モデルの基準ひずみ γ_0 を S_0 に反比例する形で増加させ、同時にせん断強度 τ_0 も増加させることにより、せん断ひずみの大きさを増加させている。せん断ひずみの増加には、塑性せん断仕事 W_s の増加に伴い、 S_0 をどのような割合で低下させるか、どこまで低下させるかが影響する。前者を規定するパラメーターが P2、後者を定めるパラメーターが S1 である。すなわち、P2 を大きくするほど、また S1 を小さくするほど大きな流動量が表現される。

数 m の流動変形及び数十%の大きなせん断ひずみを評価するには、有限ひずみ、有限変形理論を採用するべきであるが、ここでは、研究の第一ステップとして微小ひずみ、微小変形理論に基づく解析例を示す。

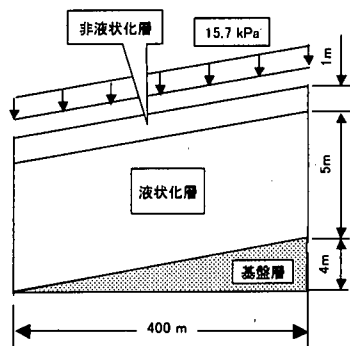


図-3 Orense の解析例

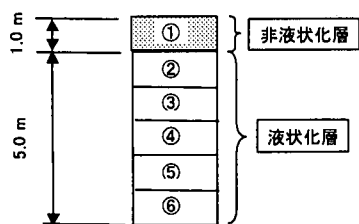


図-4 解析モデル

表-1 解析に用いたパラメーター

	非液化化層	液化化層		
		(1)	(2)	(3)
G (kPa)	20400	20400	20400	20400
K (kPa)	54400	54400	54400	54400
ϕf (deg.)	35	35	35	35
ϕm (deg.)		28	28	28
σr (kPa)		98	98	98
S1		0.005	0.001	0.003
W1		1.15	1.15	1.15
P1		0.5	0.5	0.5
P2		1.12	3.00	2.00
C1		1.6	1.6	1.6

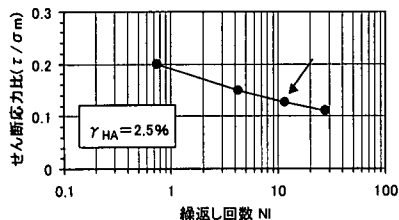


図-5 液化化強度曲線

3. 解析結果

(1) 既往の解析例との比較

a) 解析条件

Orense⁴⁾により解析された図-3に示す緩傾斜の無限斜面を解析対象とする。幅 400m、基盤層の勾配 1/100 である。ここで、Orense の解析例を取り上げ

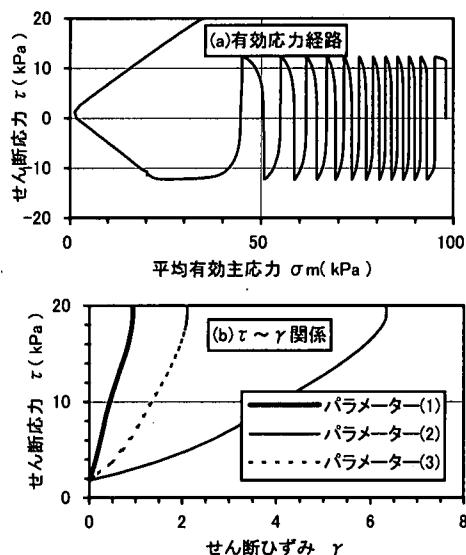


図-6 液化化後の応力～ひずみ関係、応力経路

たのは、液化化した地盤を流体としてとらえる典型的な手法との比較を行うためである。

一次元の FEM 解析モデルを図-4に、使用するパラメーターを表-1に示す。本解析例では、液化化層のパラメーターを3種類用いる。パラメーター(1)は、等価 N 値=5、細粒分含有率 $F_c < 5\%$ の場合の森田らによる推奨値¹⁰⁾である。パラメーター(2)は、前述のとおり S1 を小さく、P2 を大きくして大きな流動量が表現できるように調整したもの、パラメーター(3)はパラメーター(1)と(2)の中間的な値を採用したものである。

以下、要素試験の解析結果を示す。3者の液化化強度曲線は同一であり、これを図-5に示す。パラメーターS1とP2は、非常にゆるい砂に対してはひずみが数十%以上の応力～ひずみ関係に影響を及ぼすが、液化化強度試験で対象とする数%オーダーの関係にはほとんど影響しない。このため、同じ液化化強度曲線が得られたものである。

図-5の矢印で示した応力比において、12波目に液化化を生じさせた後、せん断応力を+側に単調増加させた場合の応力経路を図-6(a)に、応力～ひずみ関係を同図(b)に示す。応力経路は3種類のパラメーターではほぼ同じである。一方、応力～ひずみ関係は大きく異なり、パラメーター(1)では100%近いせん断ひずみが、パラメーター(2)では600%を越えるひずみが生じる。これらの違いが残留変形の違いとなって現れる。

入力地震波は、図-7に示す周期1秒、最大加速度 $\text{Max}=400\text{gal}$ の正弦波を用いる。Orense の解析は、入

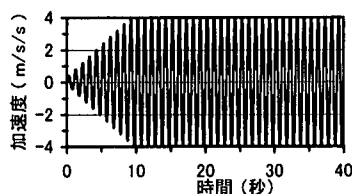


図-7 入力地震波

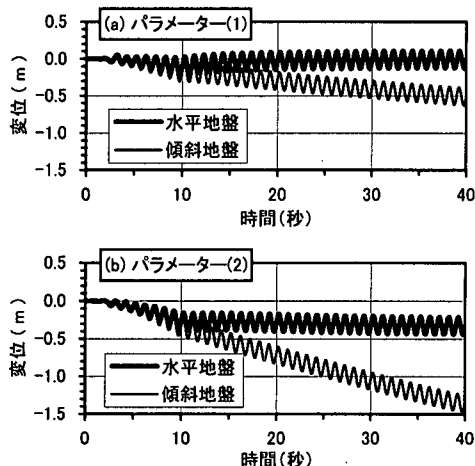


図-8 地表面変位の時刻歴

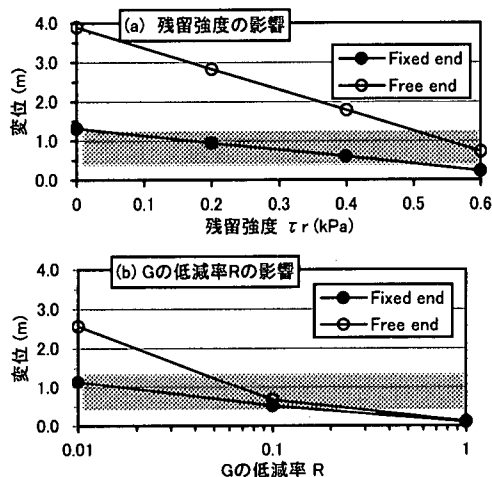


図-9 Orense の解析例との比較

力地震動を必要としない。ここでは、厚さ 5m の液状化層が全域にわたって液状化するように入力地震動を設定した。時間積分法は Wilson- θ 法 ($\theta=1.4$)、時間間隔は 0.01 秒、レイレイ減衰として $\alpha=0.0$ 、 $\beta=0.005$ を用いる。非線形反復計算には、接線剛性法を用いる。解析には四節点アイソパラメトリック要素を使用し、剛性の計算にはガウスの 1 点積分を用いる。

b) 解析結果

地表面の変位時刻歴を図-8 に示す。図(a)はパラメーター(1)を用いた場合、図(b)はパラメーター(2)を用いた場合で、図中に水平地盤の結果も併記している。パラメーター(1)を用いた場合、水平地盤では残留変位はほとんど生じないのに対し、傾斜地盤では初期せん断の方向に 50cm 程度の変位が生じる。一方、パラメーター(2)を用いた場合、水平地盤で 30cm 程度、傾斜地盤では 130cm 程度の大変位が発生する。水平地盤で残留変位が生じたのは地震動の影響であり、正弦波の符号を反転させることにより逆方向の残留変位が生じる。水平地盤と傾斜地盤の違いが表れるのは、10 秒付近以降である。これは、後述するように 10 秒付近以降両者の残留せん断ひずみのオーダーが異なることによる。

図-9 に Orense の解析で得られた斜面中央位置の変位を示す。パラメーター(1)とパラメーター(2)を用いた本解析結果の範囲は、図中の着色部になる。Orense の解析では、液状化後の地盤を流体としてモデル化しているが、用いている手法は固体に対する有限要素法そのものである²⁾。液状化層のせん断応力～せん断ひずみ (τ ～ γ) 関係として、次式が用いられており、

$$\tau = G\gamma + \tau_r \quad (4)$$

ここに、 G はせん断剛性、 τ_r は残留強度である。図-9(a) は式(4)において $G=0.0$ として τ_r を変えた場合、図-9(b) は $\tau_r=0.0$ として G の低減率 R を変えた場合の結果である。それぞれ、モデル端部の境界条件が固定および可動としたときの結果を示している。ここに、 R は式(4)で使用する G と初期状態での G の比を表す。

本解析結果は、Orense の解析における端部の境界条件を固定としたときの結果に近似しており、パラメーター S1 と P2 を調整することにより、 $\tau_r=0.0 \sim 0.6 \text{ kPa}$ 、 $R=0.0 \sim 1$ の範囲の変位が表現されることが分かる。なお、図-8 と図-9 で変位の符号が異なるのは、座標軸の符号の違いによる。

要素⑤ (図-4 参照) のせん断応力～せん断ひずみ関係を図-10 に示す。図中の矢印は、最終時刻 (40 秒) における残留せん断ひずみである。図(a)の水平地盤でパラメーター(1)を用いた場合、一側に若干ひずみがシフトしているが、大きな残留ひずみは生じていない。図(b)の水平地盤でパラメーター(2)を用いた場合、図中に示す 8 サイクル目に一側に大きなひずみが生じ、次の 9 サイクル目に+側へのひずみの回復ができないことから、一側に 5% 程度のひずみが残留している。この現象は前述のように地震動の位相の影響によるものであり、正弦波の符号を反

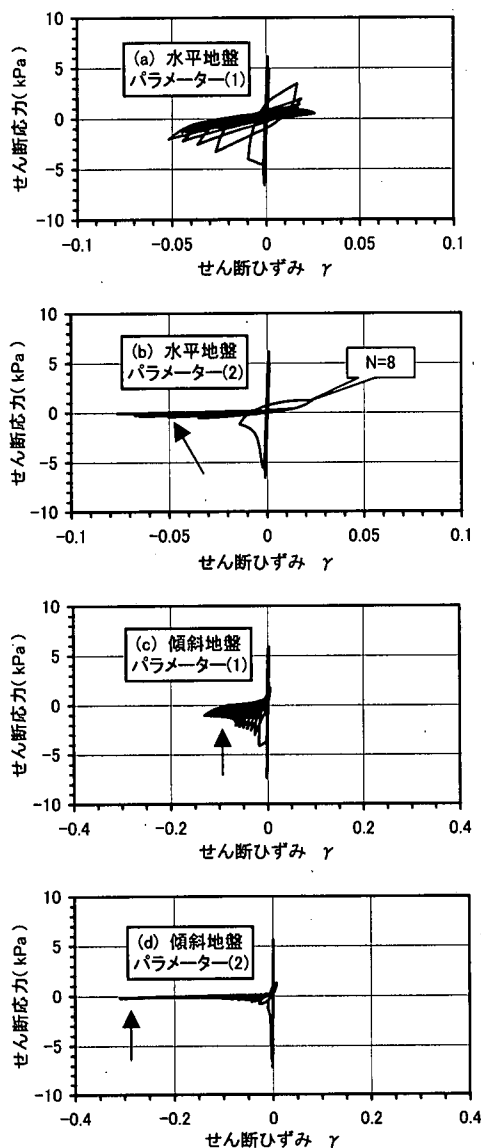


図-10 要素⑤のせん断応力～せん断ひずみ関係

転させると+側に残留ひずみが生じる。一方、傾斜地盤では初期せん断（一侧）の方向にひずみがシフトし、同時にせん断応力振幅も低下する。特に図(d)のパラメーター(2)を用いた場合、せん断応力振幅の低下も大きく、30%程度の大きな残留ひずみが生じている。この結果、130cm 程度の残留変位が生じたものである。

(2) 既往地震による流動事例との比較

濱田・若松⁵⁾は、1983年日本海中部地震、1964年新潟地震、1948年福井地震による地盤流動事例から、

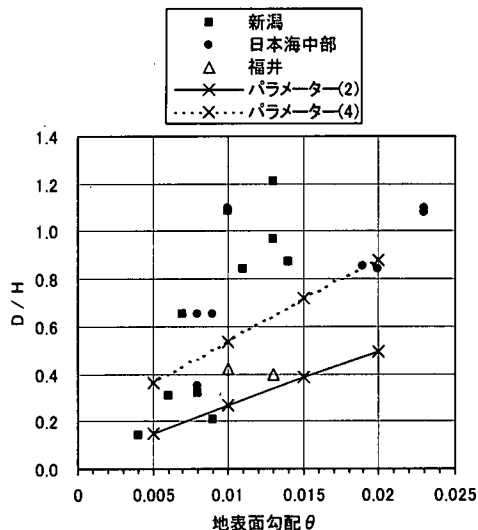


図-11 既往地震による流動事例との比較

地表面の水平変位と液状化層厚、非液状化層厚および地表面勾配との関係を検討している。これらの事例では、比較的広範囲に水平変位の方向や変位量が安定し、構造物、盛土沈下等の影響を受けていない地点が選定されている。この結果、図-11に後述するように液状化層厚 H に対する地表面変位量 D の比 D/H と地表面勾配 θ の関係に線形的な相関性が認められることを示した。 θ の定義は文献5)と同じであり、式(1)の α との関係は、 $\alpha = \tan^{-1} \theta$ である。

これらの事例で基盤層（液状化層下面）の勾配と地表面勾配が等しいと仮定して、提案手法を適用してみる。

a) 解析条件

新潟地震における10地点の平均値を用いて、液状化層厚 $H=8\text{m}$ 、非液状化層厚 $H'=1.4\text{m}$ とし、図-4と同じ要素分割数を用いる。入力地震動を含めたその他の解析条件は、前項と同様である。

b) 解析結果

表-1のパラメーター(2)を用いた場合の結果を図-11に実線で示す。図中の■、●、△印は、それぞれ新潟地震、日本海中部地震、福井地震による事例である。解析結果は、既往地震による流動事例の下限值に位置しており、変形量が比較的小さいといえる。

このため、パラメーター(2)よりさらに大きな流動が表現できるように $S1=0.005$ 、 $P2=5.0$ を用いた場合をパラメーター(4)とし、この結果を図中に併記する。ただし、入力地震動として $\text{Max}=600\text{gal}$ を用いている。パラメーター(4)は、既往地震の流動事例の平均的な変位量を表現しているようである。

入力地震動は、本来、新潟地震における流動地点での地震動を予測し、これを使用すべきである。ここでは、前述のように全層にわたって液状化が発生し、液状化層の剛性低下に伴う残留変形を求めるという意味から、図-7 の正弦波を用いた。しかし、本解析法は地震応答解析であるため、当然入力地震動の大きさ、継続時間に影響される。今後、入力地震動の流動量に与える影響に関する検討が必要である。

4. まとめ

基盤層が緩やかに傾斜した無限斜面の流動を一次元問題としてとらえ、有効応力に基づく既往の二次元液状化解析コードを用いて、流動量を簡易に算定する手法を提案した。この手法は、基盤層の傾斜によるわずかな初期せん断応力の存在が地盤流動の要因と考えたものである。

本手法を Orense の解析例、および既往地震による地盤流動事例と比較した。この結果、有効応力がゼロに接近した後の変形性能を規定するパラメーター S_1 , P_2 を調整することにより、これらの平均的な変形量を表現できることが分かった。しかし、両パラメーターの決定法は不明であり、既往の事例あるいは実験結果のシミュレーション解析を通して、データの蓄積が必要である。また、本解析法は地震応答解析であるため、当然入力地震動の大きさ、継続時間に影響される。これらに関する検討も必要である。

参考文献

- 1) Yasuda, S., Nagase, H., Kiku, H. and Uchida, Y. : The mechanism and a simplified procedure for the analysis of permanent ground displacement due to liquefaction, *Soils and Foundations*, Vol. 32, No. 1, pp. 149-160, 1992.
- 2) 安田 進, 吉田 望, 安達健司, 規矩大義, 五瀬伸吾, 増田民夫: 液状化に伴う流動の簡易評価法, 土木学会論文集, No. 638/Ⅲ-49, pp. 71-89, 1999. 12.
- 3) Towhata, I., Sasaki, Y., Tokida, K., Matsumoto, H., Tamari, Y. and Yamada, K. : Prediction of permanent displacement of liquefied ground by means of minimum energy principle, *Soils and Foundations*, Vol. 32, No. 3, pp. 97-116, 1992. 8.
- 4) Rolando P. Orense : Modeling of permanent displacement of liquefied ground and its effects on structures, D. Eng. Thesis, Univ. of Tokyo, 1990.
- 5) 濱田政則, 若松加寿江: 液状化による地盤の水平変位の研究, 土木学会論文集, No. 596/Ⅲ-43, pp. 189-208, 1998. 6.
- 6) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T. : Strain space plasticity model for cyclic mobility, *Soils and Foundations*, Vol. 32, No. 2, pp. 1-15, 1992.
- 7) 渦岡良介: 地盤の液状化発生から流動までを予測対象とする解析手法に関する研究, 岐阜大学学位論文, 2000. 1.
- 8) 西 好一, 金谷 守, 大波正行: 2. 7 NAFSS による解析, 地盤と土構造物の地震時の挙動に関するシンポジウム発表論文集, pp. 114-123, 1989. 1.
- 9) 辻野修一: 繰返しせん断を受ける砂質土の構成則と有効応力解析への適用, 東京大学学位論文, 1991. 12.
- 10) 森田年一, 井合 進, Hanlong Liu, 一井康二, 佐藤幸博: 液状化による構造物被害予測プログラム FLIP において必要な各種パラメタの簡易設定法, 港湾技研資料, No. 869, 1997. 6.
- 11) 井合 進, 松永康男, 亀岡知弘: サイクリックモビリティのモデルのパラメタの同定, 港湾技術研究所報告, 第 29 巻, 第 4 号, pp. 57-83, 1990.

(2000. 7. 7 受付)

A SIMPLIFIED PROCEDURE IN EVALUATING THE LIQUEFACTION-INDUCED FLOW ALONG THE SLIGHTLY INCLINED SLOPE

Satoshi MORIO, Shin KUSAKABE and Sumio YANAGIHARA

A simplified procedure for evaluating the liquefaction-induced flow in the slightly inclined slope is examined. The flow failure in the slope where the ground surface and the basement are slightly inclined at the same gradient is modeled as a one-dimensional problem. Using the conventional two-dimensional liquefaction code based on the effective stress, we proposed a new procedure. This procedure can simply calculate the liquefaction-induced flow. In this procedure, the existence of the initial shear stress by the inclination of the basement is considered to be an influential factor of the ground flow. By comparing the proposed procedure with Orense's analyses and with the case studies during past earthquakes, the applicability of this procedure is evaluated.