

# 改良試行くさび法 (ITWM) の 非線形すべり問題への拡張

右城猛<sup>1</sup>・小椋正澄<sup>2</sup>・筒井秀樹<sup>3</sup>・長山学史<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 (株)第一コンサルタンツ 常務取締役 (〒780-8122 高知市高須新町3-1-5)

<sup>2</sup>正会員 高知大学助教授 農学部生産環境工学科 (〒783-8508 南国市物部乙20)

<sup>3</sup>正会員 (株)第一コンサルタンツ 技術部設計2課長補佐 (〒780-8122 高知市高須新町3-1-5)

(株)第一コンサルタンツ 技術部設計1課 (〒780-8122 高知市高須新町3-1-5)

かかと版付き擁壁の合理的土圧評価法として著者らが提案している改良試行くさび法 (ITWM) は、すべり面を直線と仮定している。しかしながら、背後の盛土が一樣勾配でない場合のすべり面は非線形になる。そこで、これまでのITWMを拡張し、非線形すべり面問題への適用を可能にした。そして、拡張されたITWMとこれまでのITWMによる解析結果を比較した。また、ITWMの妥当性を検証するため、遠心力場での模型実験を行った。

その結果、すべり面の非線形性が解析結果に及ぼす影響はわずかであること、すべり面を直線と仮定したITWMによる解析値が実験結果とよく一致することが確認された。

**Key Words :** cantilever retaining wall, active earth pressure, trial wedge method, model test, design

## 1. まえがき

著者ら<sup>1),2)</sup>は、かかと版付き擁壁の仮想壁面に作用する土圧を合理的に評価する方法として改良試行くさび法 (ITWM) を提案している。これは、極限状態において、擁壁のかかとから前方と後方へ向かう二種類のすべり面が盛土内部に発生することに着目し、二つのすべり面で囲まれた土塊の極限平衡条件から力学的に曖昧な仮定を行うことなく合理的に主働土圧合力とその傾斜角を求めるものである。

ITWM では、便宜的に二つのすべり面を直線と仮定している。しかしながら、背後の盛土形状が台形をしている場合には、図-1 に示すように3種類の塑性場が形成され、遷移場Ⅲではすべり面が曲線となる。したがって、このような場合には、すべり面の非線形性を考慮した土圧評価が必要になる。

そこで本論文では、これまでに提案した ITWM のすべり面を任意多角形で置き換えることにより、非

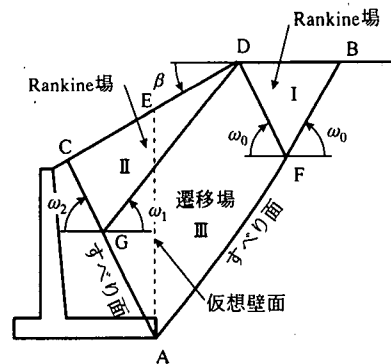


図-1 嵩上げ盛土がある場合の主働塑性場

線形すべり面問題への適用を可能にする。そして、このように拡張されたITWMとすべり面を直線と仮定した場合の解析結果について検討する。

また、遠心力場での模型実験によって主働すべり面の形状、仮想壁面位置での土圧分布を観測し、ITWM による解析値との比較検討を行う。

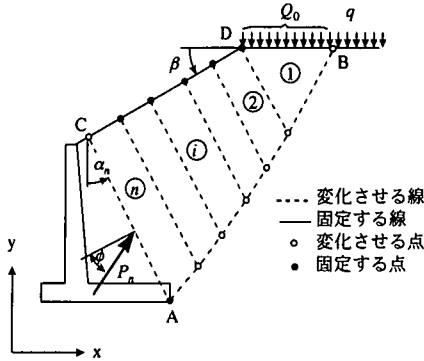


図-2 すべり土塊のブロック分割

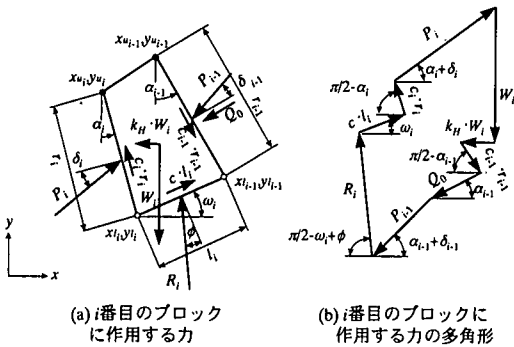


図-3 任意のブロックに作用する力

## 2. 拡張された ITWM (改良試行くさび法)

すべり面を直線と仮定した ITWM については、既に文献 2) で発表しているの、ここでは非線形すべり面を対象として拡張された ITWM についてのみ説明する。

かかと版付き擁壁が前方へ微小変位すると図-1 のようなすべり面が形成される。これらのすべり面のうち、かかとから前方へ向かうすべり面 AGC はほぼ直線となる。このため、すべり面は図-2 のように仮定する。すなわち、すべり面 AGC は 1 個の直線、すべり面 AFB は  $n$  個の直線よりなる折れ線と仮定する。そして、すべり土塊を  $(n-1)$  個の任意の四角形と 1 個の三角形のブロックに分割する。

各ブロックに作用する力は、図-3(a) のようになる。ただし、 $Q_0$  は地表面載荷重を意味し、1 番目のブロックのみに作用する。

ブロックの底面及び側面はいずれもすべり面であるので破壊条件を満たすため、反力  $P$  及び  $R$  は作用面の垂線に対して  $\phi$  だけ傾斜する。

各ブロックの形状が特定されているとすれば、ブロック頂点の各座標値は既知であるので  $r_i$ ,  $r_{i-1}$ ,  $l_i$

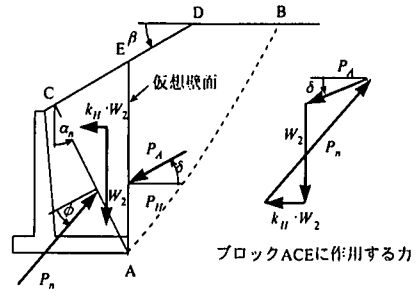


図-4 仮想壁面に作用する土圧

$\alpha_i$ ,  $\alpha_{i-1}$ ,  $\omega_i$  はいずれも決定される。また、ブロックに作用する荷重のうち、物体力  $W_i$ ,  $k_H \cdot W_i$  も既知量であり、未知量は  $P_i$ ,  $R_i$  のみである。これに対して各ブロック毎に水平方向と鉛直方向の力の平衡条件式をそれぞれ立てることができる。従って、この問題は静定である。

$i$  番目のブロックに作用する力の平衡状態は図-3(b) のように表され、これよりブロック側面反力  $P_i$  は式(1)のように求められる。

$$P_i = \{W_i \sec \theta \sin(\psi_i + \theta) + Q_0 \cos(\alpha_{i-1} - \psi_i) + P_{i-1} \cos(\alpha_{i-1} + \phi - \psi_i)\} \times \frac{1}{\cos(\alpha_i + \phi - \psi_i)} \quad (1)$$

$$\theta = \tan^{-1} k_H, \quad \psi_i = \omega_i - \phi \quad (2)$$

$$\text{ただし、} \omega_i \leq \omega_{i-1} \text{ [制約条件]} \quad (3)$$

$i$  番目のブロックから順次計算を進めて行けば、 $n$  番目ブロックの  $P_n$  を求めることができる。

次に、図-4 に示すように擁壁のかかと後端から鉛直に立てた仮想壁面 AE と、すべり面 AC に囲まれた土塊 ACE に作用する力の平衡について考える。この土塊に作用する力は、土塊 ACE の自重  $W_2$  と慣性力  $k_H \cdot W_2$ 、すべり面 AC からの反力  $P_n$  それに仮想壁面に作用する内力  $P_A$  である。 $P_n$  は既に求まっているので未知量は  $P_A$  と  $\delta$  だけである。従って、 $P_A$  と  $\delta$  は力の平衡条件のみで式(4)、式(5)のように求めることができる。

ところで、前述のようにブロックを分割して求められる極限平衡法の解は、主動土圧の場合には極値

$$-P_A = \frac{P_n \cos(\phi + \alpha_n) - W_2 \tan \theta}{\cos \delta} \quad (4)$$

$$\delta = \tan^{-1} \left\{ \frac{P_n \sin(\phi + \alpha_n) - W_2}{P_n \cos(\phi + \alpha_n) - W_2 \tan \theta} \right\} \quad (5)$$

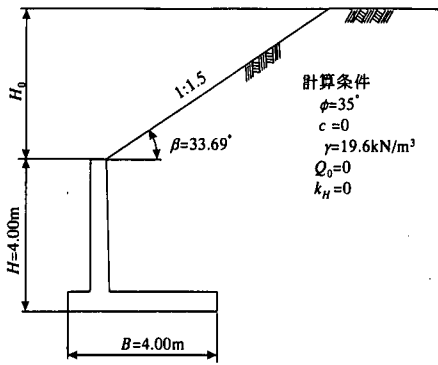


図-5 試算断面

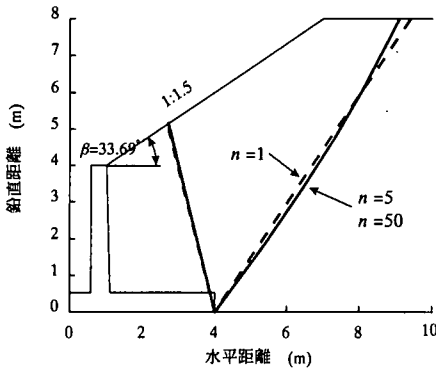


図-6 分割ブロック数とすべり面の形状

定理の下界値になることが覆ら<sup>3),4)</sup>の研究で明らかにされている。したがって、式(1)~(5)で、 $\alpha_i$ ,  $r_i$ を変化させて計算し $P_A \cos \delta$ の最大値を探索すれば、 $P_A$ が仮想壁面に作用する主働土圧合力になる。ソルバー機能を備えた表計算ソフトを利用すれば、簡単に最大値を探索することが可能である。

### 3. 試算

ブロック分割数が解析結果に及ぼす影響を調べるため、図-5に示す逆T型擁壁の仮想壁面に作用する主働土圧合力を算定する。ただし、盛土の傾斜角 $\beta=33.69^\circ$ 、せん断抵抗角 $\phi=35^\circ$ 、粘着力 $c=0$ 、盛土の単位体積重量 $\gamma=19.6\text{kN/m}^3$ 、地表面過載荷重 $Q_0=0$ 、設計水平震度 $k_H=0$ とした。

図-6は、嵩上げ盛土高さ $H_0=4\text{m}$ の場合について、分割数 $n=1$ ,  $n=5$ ,  $n=50$ のそれぞれで求められた主働すべり面を示している。 $n=1$ のすべり面は直線である。ブロック数を増やして計算すると、遷移場で曲線のすべり面が出現する。分割数を5以上としてもすべり面の形状にはほとんど差異が見られない。こ

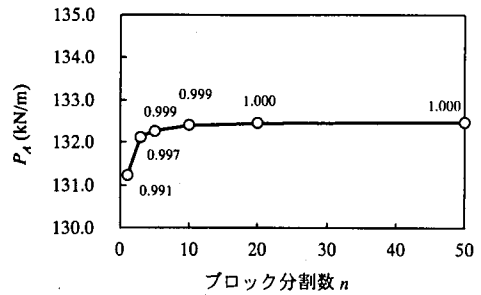


図-7 分割ブロック数と主働土圧合力の関係

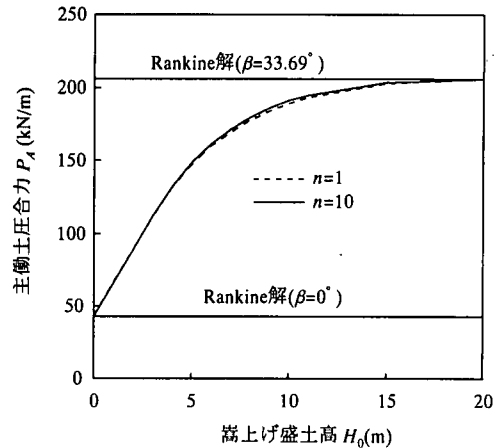


図-8 嵩上げ盛土高と主働土圧合力の関係

の傾向は $Q_0=1.0\text{tf/m}^2$ あるいは $k_H=0.20$ としたときも同様であることを確認している。

図-7は分割数 $n=1, 3, 5, 10, 20, 50$ の6ケースについてそれぞれ仮想壁面での主働土圧合力 $P_A$ を計算した結果である。ただし、嵩上げ盛土高さは $H_0=4\text{m}$ としてある。図中の数値は、分割ブロック数を $n=50$ とした解析値に対する比を表している。 $n=10$ 程度以上とすれば解析値は一定値に収れんする。 $n=1$ と $n=50$ の解析誤差は0.9%とわずかである。

図-8は、 $n=1$ と $n=10$ とした場合について、嵩上げ盛土高さ $H_0$ を0mから20mまで変化させて主働土圧合力 $P_A$ を計算した結果である。分割数に関係なく $H_0=0$ では地表面が水平の場合のRankine解に一致している。また、 $H_0=20\text{m}$ では地表面が $\beta=33.69^\circ$ で一樣勾配のRankine解に収れんしており、塑性理論解が得られていることを意味している。0m $<H_0<20\text{m}$ の間でも分割数が主働土圧に及ぼす影響は非常に少ない。

以上より、既に提案しているITWMを適用して主働土圧を算定しても工学的に問題になるものではないといえる。

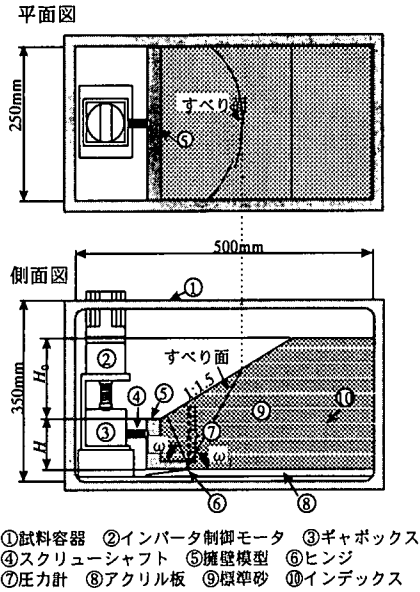


図-9 実験装置

#### 4. 遠心力模型実験

##### (1) 実験の概要

###### a) 実験装置および計測システム

実験装置は、図-9に示すように遠心载荷容器内に設置されたヒンジ構造を持つL型擁壁模型、インバータ制御方式の壁変位用モーター、容器外壁に取り付けられた加速度計で構成されている。

土圧は、L型擁壁の仮想壁面位置に埋設した受圧板径6mmの圧力計で計測した。圧力計の較正は水と砂で行った。载荷容器内に水を入れ、容器側面に圧力計を貼り、遠心载荷による水面形状を考慮した水圧を計算して行った。また、圧力計を容器底面に貼り付けた場合と砂層中に埋設した場合について、砂層密度及び遠心加速度から土被り圧を計算した鉛直圧により行った。容器底面に張り付けた場合は、圧力計周辺部での応力集中が生じ砂層のわずかな密度差で測定値に大きなばらつきを生じたが容器中央付近の砂層中に埋設した場合は、水による較正值から±10%以内であった。

遠心加速度および土圧の計測データは、スリッピングおよびデータロガーを介しコンピュータへ取り込んだ。

###### b) 擁壁模型と実験試料

実験に用いた模型擁壁はアクリル板で製作した。寸法は、全高が10cm、かかと版長が5.5cmである。アクリル板の厚さは、かかと版は1.5cmであるが、たて壁は曲げ変形を抑制するため3.0cmとした。

擁壁の裏込材には、気乾状態の豊浦標準砂を用いた。せん断抵抗角は、密度 $1.523\text{g/cm}^3$ に締め固め三軸圧縮試験で求めた。その結果 $\phi=39.9^\circ$ であった。

##### c) 実験の方法

擁壁模型を組み込んだ試料容器に豊浦標準砂を密度 $1.523\text{g/cm}^3$ となるよう厚さ1.5cm毎に板で締め固めて盛土を形成した。嵩上げ盛土は1:1.5勾配とし、5種類の盛土高さ(0, 2.5, 5.0, 10, 15cm)について実験を行った。

圧力計は擁壁中央部の下端から1.5cm間隔で受圧面が鉛直になるように埋設した。

また、すべり面を観察するため、裏込め材の充填過程で、試料容器前面に高さ3cm毎に石英砂を幅1.0cm、厚さ3mmで水平に敷きインデックスとした。なお、容器前面のアクリル板と試料の間には、摩擦の軽減を図るため、幅1.0cmの短冊状のテフロンシートを中央に挟んだ三層構造のテフロンシートを挟んでいる。

実験は、裏込め試料を所定の形状に盛土した後、50Gの遠心加速度を作用させ、 $0.4^\circ/\text{min}$ の変位スピードで変位角が $4^\circ$ になるまで擁壁に回転変位を与えた。そして、試料容器前面のアクリル板にトレース用シートをあててすべり面の形状を記録した。土圧の計測データは、15sec毎にパソコンへ自動的に取り込んだ。実験は5回実施し、その平均値を実験結果とした。なお、測定データのばらつきは圧力計埋設深さによって異なり、平均値に対して上部から3cm以内が±50%、それ以深が±10%であった。

##### (2) 実験結果及び考察

###### a) すべり面

試料容器前面で観察されたすべり面を図-10に示す。擁壁のかかとから前方へ向かうすべり面は確認することができなかった。一方、後方へ向かうすべり面は確認されたものの、明瞭なものではない。

また、盛土表面に現れたすべり面は図-9の平面図に示したように曲線を描いており、擁壁に平行とはなっていない。このことから、標準砂とアクリル板の間の摩擦の影響が現れたものと考えられる。そこで、すべり角は後方へ向かうすべり面についてのみ測定した。その場合、容器中央で側面の摩擦の影響が最も小さくなると考えられるので、図-9の側面図に示したように容器中央部の盛土表面に現れるすべり線と擁壁のかかとを直線で結んですべり角を求めた。

実験で得られたすべり角とITWMによる計算結果を図-11に示す。両者はほぼ一致しているといえる。

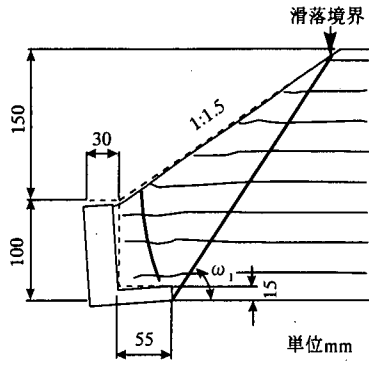


図-10 主働すべり面の形状

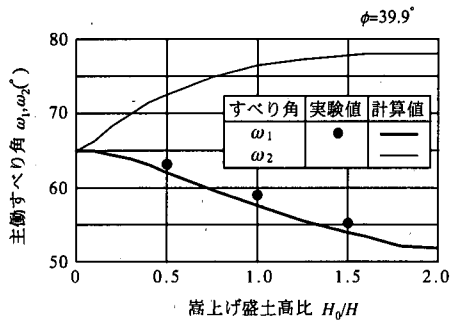


図-11 主働すべり角の比較

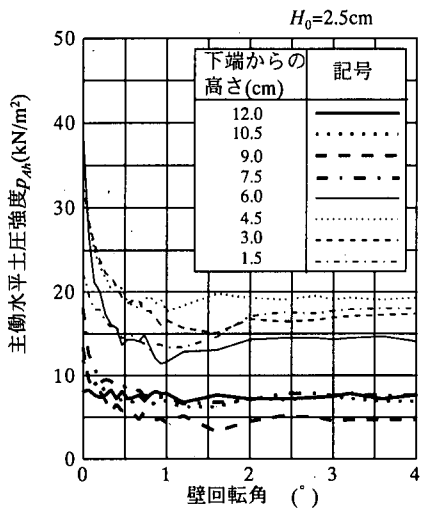
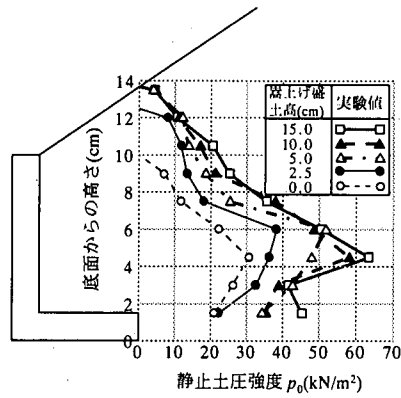


図-12 回転角と水平土圧合力の関係

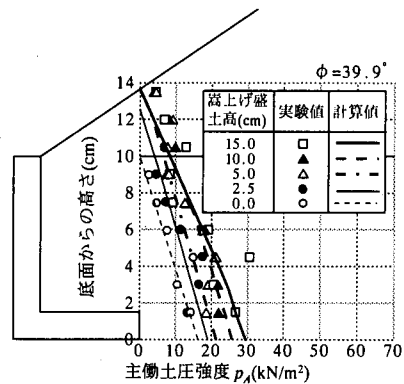
### b) 回転角と土圧の関係

図-12は嵩上げ盛土高 $H_0=2.5\text{cm}$ の場合について、模型擁壁の回転角と盛土材内部の仮想壁面上での水平土圧強度の関係を示したものである。

わずかに回転変位させるだけで土圧は急激に減少し、回転角度 $1^\circ$ 程度で主働状態へ移行する。この傾向は、他の嵩上げ盛土高の場合においても同様であ



(a) 静止土圧



(b) 主働土圧

図-13 仮想壁面での水平土圧分布

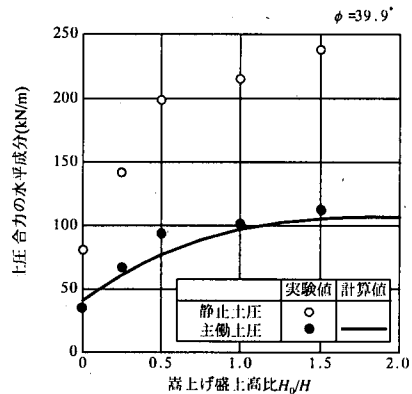


図-14 嵩上げ盛土高比と水平土圧合力

った。これより、回転角 $0^\circ$ の時の土圧を静止土圧、回転角度 $1^\circ$ のときの土圧を主働土圧と見なすことにした。

### c) 仮想壁面上の土圧分布

仮想壁面上での水平方向の静止土圧分布および主働土圧分布を図-13に示す。静止・主働土圧とも三角形分布とはならず擁壁の中央付近で最大になるよ

うな分布を示している。これは砂のアーチ作用、容器底面の摩擦の影響等によるものと推察される。

#### d) 嵩上げ盛土高と土圧の関係

図-14は、仮想壁面における土圧合力の水平成分と嵩上げ盛土高の関係を示したものである。主働土圧合力の水平成分は、ITWMによる計算値と概ね一致している。

## 5. 結 論

本研究では、著者らが提案してきたかかと版付き擁壁の合理的な土圧評価法であるITWM（改良試行くさび法）を非線形すべり面問題に拡張し、その定式化を行うと共に、すべり面を直線と仮定したこれまでに提案しているITWMと比較した。

また、これまでの研究<sup>5),6)</sup>では、豊浦標準砂あるいはピアノ線を用いた重力場での模型実験によって主働すべり面のみを観測し、ITWMの妥当性を検証していたが、本研究では、遠心模型実験によって主働すべり面以外に仮想壁面上の水平土圧についても測定し、ITWMの妥当性を確認した。

本研究で得られた結論をまとめると以下のようになる。

- (1) すべり土塊をブロックに分割することにより、すべり面の非線形性を考慮した主働土圧を簡単に算定することができる。
- (2) ブロック分割数が解析結果に及ぼす影響はわずかであり、すべり面を直線と仮定したITWMを適用しても工学上問題になることはない。
- (3) すべり面を直線と仮定したITWMで求められる主

働すべり角は、模型実験結果とほぼ一致する。

- (4) 仮想壁面上の主働土圧合力の水平成分は、すべり面を直線と仮定したITWMの計算値と概ね一致する。

## 参考文献

- 1) 右城猛, 筒井秀樹, 函師直史, 小椋正澄: 逆T型擁壁の土圧評価法に関する一提案, 技術・研究発表会発表論文集, 土質工学会四国支部, pp.39,1991.
- 2) 右城猛, 八木則男, 矢田部龍一, 筒井秀樹: かかと版付き擁壁の合理的な土圧評価法, 土木学会論文集, No.567/VI-35, pp.189-198,1997.
- 3) Meiketsu ENOKI, Norio YAGI, Ryuichi YATABE and Eizaburo ICHIMOTO: Generalized Limit Equilibrium Method and its Relation to Slip Line Method, *Soils and Foundations*, Vol.31, No.2, pp.1-13,1991.
- 4) Meiketsu ENOKI, Norio YAGI, Ryuichi YATABE and Eizaburo ICHIMOTO: Relation of Limit Equilibrium Method to Limit Analysis Method, *Soils and Foundations*, Vol.31, No.4, pp.37-47,1991.
- 5) 函師直史, 右城猛, 小椋正澄: 逆T型擁壁のすべり面に関する模型実験, 第44回土木学会中国四国支部研究発表会講演概要集, pp.408-409, 1992.
- 6) 八木則男, 矢田部龍一, 右城猛, 武山宗平, 羽山里志: かかと版付き擁壁の主働すべり面に関する模型実験, 第31回地盤工学会研究発表会講演集, pp.1937-1938, 1996.

(1997. 10. 24受付)

## ENHANCEMENT OF IMPROVED TRIAL WEDGE METHOD FOR NONLINEAR SLIDE PROBLEMS

Takeshi USHIRO, Masazumi OGURA, Hideki TSUTSUI and Hisashi NAGAYAMA

We are proposing use of Improved Trial Wedge Method (ITWM) as a rational evaluation method of earth pressure on the cantilever retaining wall. However, this method is limited to linear failure surface. When backfill slope is not uniform, failure surface become nonlinear making ITWM inapplicable. In order to solve this problem, we enhanced ITWM to apply to the nonlinear slide problems.

In order to prove applicability of this method, we compared analytical results of enhanced ITWM and conventional ITWM. We also performed model test under centrifugal force to compare experimental and theoretical results.

As the results, we discovered that the shape of failure surface had little effects to analytical result, and there were close results between experimental model and theoretical results of ITWM.