

## 有限変形有限要素法によるマッドランプ形成過程の数値シミュレーションと

## その学際的評価

Numerical Simulation of Mudlump Formation Using Finite Element Method and  
Its Integrated Evaluation

亀井健史 Takeshi KAMEI (宮崎大学工学部)  
 松江寛成 Kansei MATSUE (島根大学大学院総合理工学研究科)  
 志比利秀 Toshihide SHIBI (島根大学総合理工学部)

1991年、島根県中海飯梨川河口に突如として泥の島が出現した。マッドランプと呼ばれるこの現象の形成過程についての報告例は少なく、土砂堆積からマッドランプの出現に至る軟弱地盤の変形挙動を明らかにすることは有益である。一方、地盤の変形解析を行う際に、簡単な室内試験で決定可能な塑性指数から地盤の構成モデルに必要な土質定数を推定して用いる簡易変形解析がある。この解析手法はいくつかの実地盤への適応例があり、その信頼性が実証されている。本研究では、簡易変形解析手法を用いた有限変形有限要素解析によって、マッドランプの形成過程をシミュレートした。さらに本解析結果と地球科学的情報とを併せることでマッドランプの変形挙動を明らかにした。

キーワード：コンシステンシー限界、有限要素法、マッドランプ、軟弱地盤 (IGC : E02, E13)

## 1. はじめに

軟弱粘性土地盤上に道路や鉄道の盛土、あるいは河川堤防などの土構造物を建設する際には、基礎地盤の変形・破壊挙動に注意を払う必要がある。このような地盤の変形・破壊挙動を評価したり、予測したりする方法の一つとして、数値解析手法の利用が挙げられる。その中でも有限要素法は、近年の計算機の発達と土の力学的挙動を良く説明できる構成モデルの提案に伴って、土の構成モデルに用いる土質定数を精度良く得ることができれば、複雑な条件のもとでも工学的に十分な精度と時間で予測可能となってきた。とくに、塑性指数を用いた簡易土質定数決定法と地盤の簡易化モデル手法を適用した地盤の簡易変形解析は、詳細な地盤情報および荷重に伴う動態観測結果が得られているいくつかの試験盛土の変形挙動評価に用いられており、その手法が簡便性と高い信頼性を有することが報告されている<sup>1)~4)</sup>。

一方、自然の営力によって発生する地質現象は、一般に初期の地盤状態や地盤の変形挙動に関する情報が少ない。例えば、1991年1月末、島根県の中海に流れる飯梨川の河口に突如として2つの泥の島が出現した<sup>5)</sup> (図-1, 2)。しかしながら、泥の島が出現する前の地盤情報やその形成時の地盤変状の動態観測などは行われておらず、その変形挙動を評価することは難しい。

このような河川の河口に突如現れる泥の島はマッドランプと呼ばれている。しかし、このマッドランプに関する報告例は世界中でも少なく、その大半が北米のミシシ



図-1 飯梨川河口に出現したマッドランプ<sup>5)</sup>

ピ川に出現したマッドランプについてのものである。ミシシッピ川では1900年代初頭から水路確保のために堤防建設が行われていたが、この堤防建設により河川を流れる大量の土砂が狭い範囲に堆積し、その結果、デルタの一方向への急激な前進とともに次々とマッドランプが形成されていった。とくに、ミシシッピ川の河口に位置

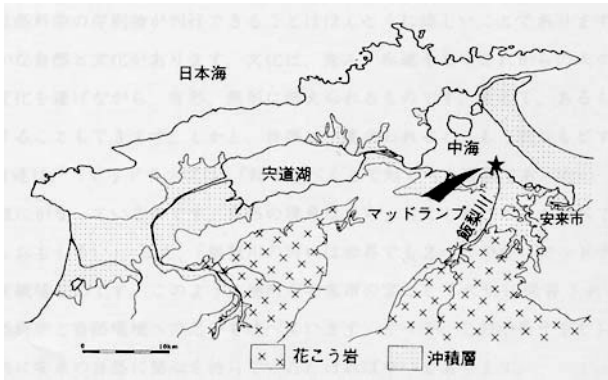


図-2 中海と飯梨川に現れたマッドランプの位置<sup>5)</sup>

するSouth Passでは、1867年から1961年までの間に104個のマッドランプの出現が確認された。このミシシッピ川の河口に出現したマッドランプの形成過程についてはダイアピル説<sup>6)</sup>が有力であり、MORGAN *et al.*<sup>6), 7)</sup>が詳しく報告している。

一方、飯梨川河口に出現したマッドランプに関しても報告がなされている<sup>5)</sup>。飯梨川河口に出現した2つの泥の島は、ミシシッピ川河口に出現するマッドランプとほぼ同じものであるとよいがその形成機構には違いが認められる。飯梨川のマッドランプは、アカホヤ火山灰層のような広域テフラの繰り返しなどの地球科学的側面や安定解析の手法の一つである円弧すべり解析などの地盤工学的側面から研究されている。その結果、その形成過程は、デルタ先端部分への土砂の急激な堆積によるデルタ下層の軟弱地盤の円弧すべり的な崩壊現象がデルタ前方の湖底を上昇させた結果であると推察されている。

このように、飯梨川のマッドランプの形成過程は、見方を変えれば、厚い軟弱粘性土地盤の土砂堆積に伴う変形挙動の一つと考えられる。したがって、土砂の堆積からマッドランプの出現に至る一連の変形挙動を明らかにすることはマッドランプの現象解明において重要であると考えられる。

そこで本研究では、飯梨川河口に出現したマッドランプ形成に伴う地盤の変形挙動を明らかにするために、地盤の簡易変形解析を実施した。また、詳細な地盤情報や動態観測結果が得られていない現場への簡易変形解析手法の適用性についても検討している。その際、マッドランプ出現後のボーリング調査から得られた鍵層などの地球科学的情報を用いて変形解析の結果の検証を行った。その結果、本解析手法が、マッドランプの形成過程を解析的に明らかにできる可能性を示唆した。

## 2. マッドランプ

マッドランプに関する報告例の大半はミシシッピ川河口におけるものであり、16世紀から注目されてきた。同時にそれがどのようにして形成されたかについての議論

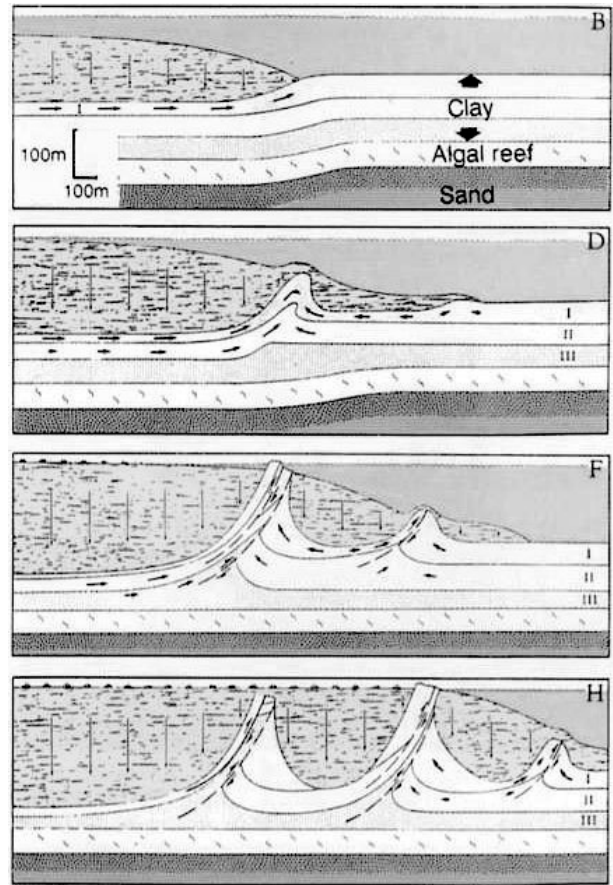


図-3 マッドランプの形成過程 (ダイアピル説)<sup>6)</sup>

もされており、以下にこれまでに報告されているマッドランプの形成過程のいくつかを紹介する。

まず、ミシシッピ川河口におけるマッドランプに関して、MORGAN *et al.*<sup>6), 7)</sup>はボーリング調査の結果に基づいて、形成過程を説明している。その過程は、デルタの先端に堆積した砂質堆積物の荷重によってその下層にある粘土層が側方流動を起こして、それがダイアピル褶曲の高まりをなし、逆断層となって上昇、マッドランプを形成するというものである (図-3)。このようなマッドランプの形成過程はダイアピル説と呼ばれる。

一方、1967年にネバダ州のピラミッド湖に出現したマッドランプに関しては、マッドランプの隆起後もその成層構造を保持することから、デルタの急成長によって生じた荷重が湖底下の高間隙水圧帯を伝わってゆき、沖合にマッドランプを隆起させるという間隙水圧説により説明されている (図-4)<sup>8)</sup>。

今回解析の対象とする飯梨川河口のマッドランプは上記のどちらとも異なる形成過程が提案されている<sup>5)</sup>。これは、1991年に行われたボーリング調査に基づいており、地球科学的観点および地盤工学的観点から推察されている。図-5は、東側に現れたマッドランプの中央付近で行われたボーリング調査 (図-1中、白丸の地点) の結果から得られたマッドランプとデルタの地下構造を示している。このボーリング調査によって、深度15m (湖底面か



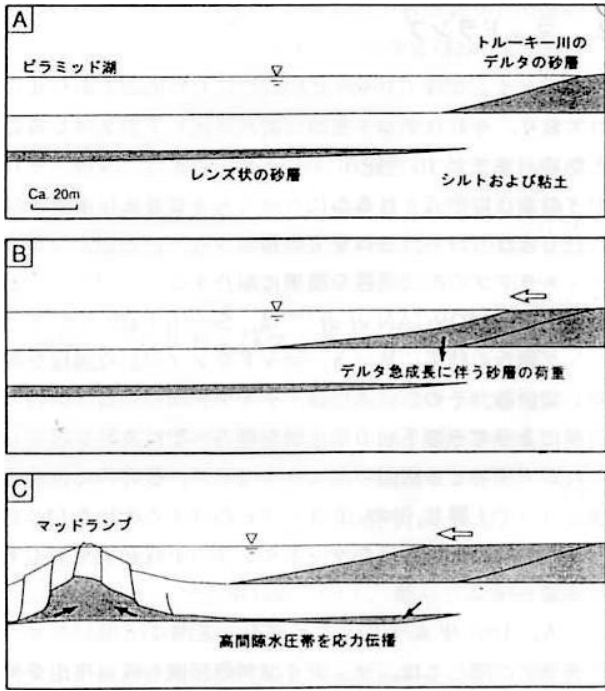


図-4 マッドランプの形成過程（間隙水圧説）<sup>8)</sup>

らの深度は 10m, 以下括弧内は湖底面からの深度を表す) 以深と深度 22m (17m) 以深の層序が同じであることがわかる。また、深度 18m (13m) と深度 24m (19m) には広域テフラのアカホヤ火山灰層<sup>9)</sup>が存在している。このアカホヤ火山灰層は、いわゆる鍵層で、ある特定の時期に広範囲にわたって形成された地層である。さらに、深度 21m (16m) 以浅の範囲では地層に傾斜が認められるが深度 23m (18m) 以深においては地層に傾斜は認められなかった。深度 30m (25m) 以深においては、シルト質砂～砂の更新統砂層が確認された。また、図-6 にマッドランプとその周辺の地質調査結果を示す。この図より、デルタ先端の沈降やマッドランプに広域テフラのアカホヤ火山灰層を含んだ同一層順の繰り返し、逆断層が推定されることなどの報告がされている。このような同一層順の繰り返しはダイアピル説や間隙水圧説では説明が難しく後方回転を伴ったすべりで形成されたことを示唆しており、飯梨川河口のマッドランプの形成過程は円弧すべり破壊により説明が可能であるといわれている (図-7) <sup>5)</sup>。

以上の様に、マッドランプの形成過程については様々な説で説明がなされている。しかし、その現象はいずれも軟弱粘性土地盤の変形によるものであるが、マッドランプの形成が認められる地域は限られているのが現状である。その原因には泥質堆積物が卓越する静かな内湾または湖といった堆積場と、そこに堆積する土砂が形成するデルタの急速な成長に伴う外過重の急激な増加の2つの成因が考えられている。しかし、このような条件を満たす地域は少なく、自然現象として発生した例は極めて少ない。よって、今後、軟弱泥質堆積物が厚く堆積する

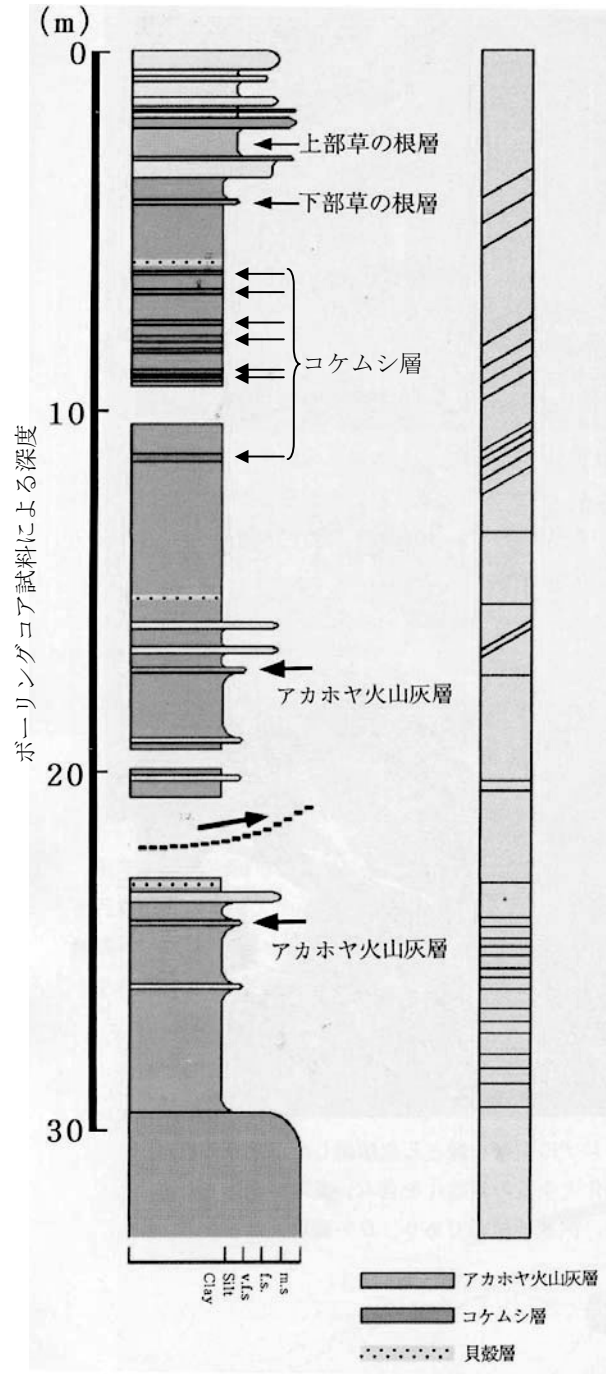


図-5 マッドランプとデルタの地下構造<sup>5)</sup>

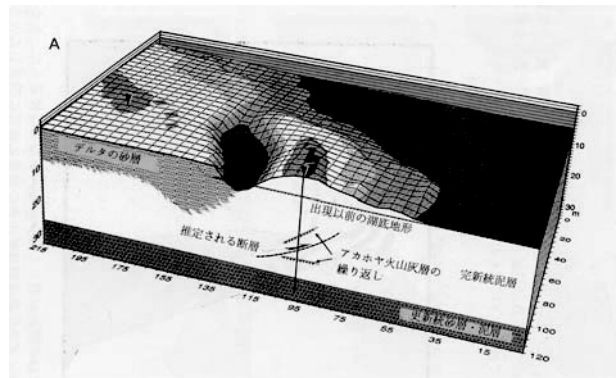


図-6 マッドランプとその周辺の地質調査結果<sup>5)</sup>

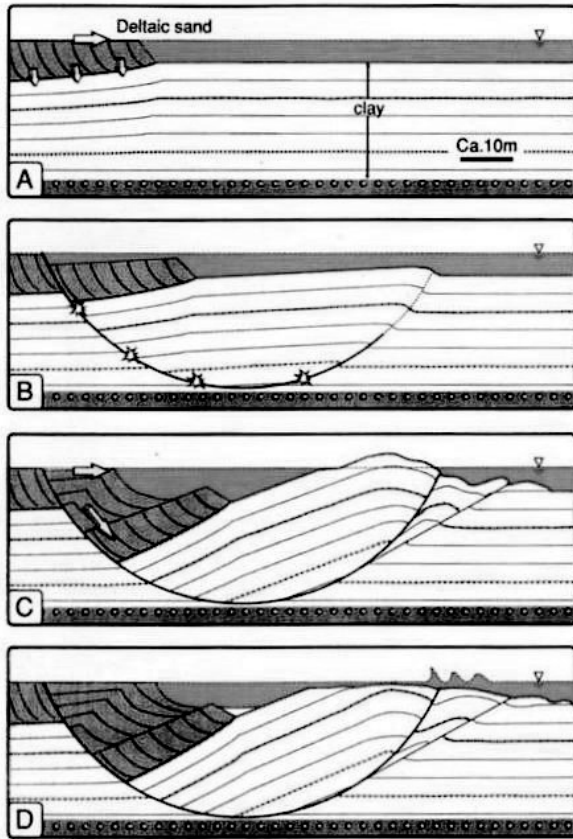


図-7 マッドランプの形成過程（円弧すべり破壊説）<sup>5)</sup>

地域を開発する場合に人為的災害として発生する可能性も考えられる。マッドランプのような現象は地盤の破壊現象として捉えることができ、地盤工学的にとっても重要な現象であるとも言え、マッドランプの形成メカニズムを解明することは非常に重要なことである。

### 3. 土の構成モデル

本研究では、粘性土の構成モデルとしてCam-clayモデル<sup>10), 11), 12)</sup>を用いている。Cam-clayモデルは粘性土の圧密およびせん断挙動を4つの土質定数( $\lambda, \kappa, e, M$ )で統一的に表現できるモデルである。本研究では、有限変形解析を実施することから、有限変形場に拡張されたCam-clayモデル<sup>13)</sup>を用いる。

まず、全Cauchy応力 $T_{ij}$ 、有効Cauchy応力 $T'_{ij}$ と間隙水圧 $u$ の間に次式で与えられる有効応力の原理を仮定する。

$$T_{ij} = T'_{ij} - u\delta_{ij} \quad (1)$$

ここで、 $\delta_{ij}$ はクロネッカーのデルタを表す。平均有効応力 $p'$ と一般化された偏差応力 $q$ は、それぞれ次式で定義される。

表-1 塑性指数と土質定数の関係<sup>14) ~16)</sup>

土質定数	相関関数
$\lambda = 0.02 + 0.0045 \cdot PI$	0.98
$\kappa = 0.00084 \cdot (PI - 4.6)$	0.94
$N = 1.517 + 0.019 \cdot PI$	0.95
$M_C = 1.65$	—
$M_E = 1.385 - 0.00505 \cdot PI$	0.85
$K_{0NC} = 0.45$	—

$$p' = -\frac{1}{3}T'_{ii}, \quad q = \sqrt{\frac{3}{2}S'_{ij}S'_{ij}} \quad (2)$$

ここで、 $S'_{ij}$ は有効Cauchy応力 $T'_{ij}$ の偏差成分である。

このとき、有限変形 Cam-clay モデルの降伏関数 $f$ は次式で表される。

$$f = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e} \ln \frac{p'}{p'_0} + D\eta - v^p \quad (3)$$

ここで、 $\lambda$  と  $\kappa$  は自然対数表示による圧縮指数と膨潤指数、 $e_0$ は初期間隙比、 $p'$ は平均有効主応力であり、 $p'_0$ は $p'$ の初期値を表す。また、 $D$ はダイレイタンス係数で、限界状態での応力比  $M$  を用いて  $D = (\lambda - \kappa) / \{M(1 + e)\}$  と表現できる。さらに、 $\eta = q/p'$ であり、 $v^p$ は塑性体積ひずみを表している。

一方、速度勾配  $L_{ij} = \partial \dot{x}_i / \partial x_j$  を考えるとき、 $D_{ij} = (L_{ij} + L_{ji})/2$  を変形速度、 $W_{ij} = (L_{ij} - L_{ji})/2$  をスピンと呼ぶ。変形速度  $D_{ij}$  が弾性成分  $D_{ij}^e$  と塑性成分  $D_{ij}^p$  との和で表されたと考え、その弾性部分に対して次式で示されるフックの法則を仮定する。

$$\overset{\circ}{T}'_{ij} = \left\{ \left( \tilde{K} - \frac{2}{3} \tilde{G} \right) \delta_{ij} \delta_{kl} + \tilde{G} (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) \right\} D_{kl}^e \quad (4)$$

ここで、 $\overset{\circ}{T}'_{ij} = \dot{T}'_{ij} - W_{ik} T'_{kj} + T'_{ik} W_{kj}$  は有効 Cauchy 応力の共回転速度を表す。また、 $\tilde{K} = [(1 + e) / \kappa] p'$  は体積弾性係数を、 $\tilde{G} = [\{3(1 - 2\nu)(1 + e)\} / \{2(1 + \nu)\kappa\}] p'$  はせん断弾性係数を表している。

塑性部分に関しては、降伏関数  $f$  に対して関連流れ則を適用することで、次式が得られる。

$$D_{ij}^p \begin{cases} = \Lambda N_{ij} (f = 0, \text{および } N_{ij} \dot{T}'_{ij} > 0) \\ = 0 (f < 0, \text{あるいは } N_{ij} \dot{T}'_{ij} \leq 0) \end{cases} \quad (5)$$

ここで、 $\Lambda$  は比例定数である。 $N_{ij}$  は、 $\beta = M - \eta$  とおくと次式で表される。

表-2 PI から推定した土質定数

深度(m)	PI	$\lambda$	$\kappa$	$e_0$	$M$	$\nu'$	$k_{v0}(\text{m/日})$
0.0-5.4	119	0.556	0.096	2.778	1.217	0.31	$6.91 \times 10^{-1}$
5.4-10.4	121	0.565	0.098	2.816	1.212	0.31	$6.91 \times 10^{-1}$
10.4-12.2	76	0.362	0.060	1.961	1.326	0.31	$6.91 \times 10^{-1}$
12.2-14.2	72	0.344	0.057	1.885	1.338	0.31	$6.91 \times 10^{-1}$
14.2-15.5	43	0.214	0.032	1.334	1.409	0.31	$6.91 \times 10^{-1}$
15.5-18.1	81	0.385	0.064	2.056	1.313	0.31	$6.91 \times 10^{-1}$
18.1-21.9	82	0.389	0.065	2.075	1.310	0.31	$6.91 \times 10^{-1}$
21.1-25.0	49	0.241	0.037	1.448	1.394	0.31	$6.91 \times 10^{-1}$

$$N_{ij} = \frac{D}{p'} \left( \frac{3}{2\eta} \frac{S_{ij}}{p'} - \frac{1}{3} \beta \delta_{ij} \right) \quad (6)$$

このとき、最終的な有限変形場の Cam-clay モデルの構成式は次式となる。

$$\begin{aligned} \dot{T}'_{ij} = & \left\{ \left( \tilde{K} - \frac{2}{3} \tilde{G} \right) \delta_{ij} \delta_{kl} + \tilde{G} (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) \right. \\ & \left. - \frac{1}{\tilde{G} + \tilde{K} \tilde{\beta}^2 + h} \left( \frac{\tilde{G}}{\tilde{\tau}} S_{ij} - \tilde{K} \tilde{\beta} \delta_{ij} \right) \left( \frac{\tilde{G}}{\tilde{\tau}} S_{kl} - \tilde{K} \tilde{\beta} \delta_{kl} \right) \right\} D_{kl} \quad (7) \end{aligned}$$

ここで、 $\tilde{\beta} = (M - \eta) / \sqrt{3}$ 、 $\tilde{\tau} = \sqrt{S \cdot S} / 2$  と置いており、 $h = (\tilde{\beta} / \sqrt{3} D) p'$  は硬化係数である。

#### 4. 解析手法

近年の計算機の発達と土の力学挙動をよく説明できる構成モデルの出現によって、土の構成モデルに必要な土質定数が精度良く得られれば、複雑な条件のもとでも有限要素法を用いることによって地盤の変形挙動を工学的に十分な精度で予測することが可能となってきている。本研究で解析対象とした飯梨川のマッドランプでは一連の調査が行われており、解析に必要な土質定数が得られている。しかしながら、実際の工事等において解析に必要な土質定数がすべて得られていることは少なく、得られていない場合には地盤変形解析を行うことは不可能となる。また、十分な土質試験が行われ、解析に必要な土質定数が得られたとしても、必然的に多くの費用がかかることとなる。この問題を解決する方法として、解析に必要な土質定数を塑性指数(PI)のみから推定する方法がある。PI は比較的簡単な試験でその値を得ることができ、一般に通常の工事でも求められる。

このような観点に基づき、亀井<sup>14)</sup>、<sup>15)</sup>、Nakaseら<sup>16)</sup>は広範な土に対しての適応性と簡便性に基づいて、同じく構

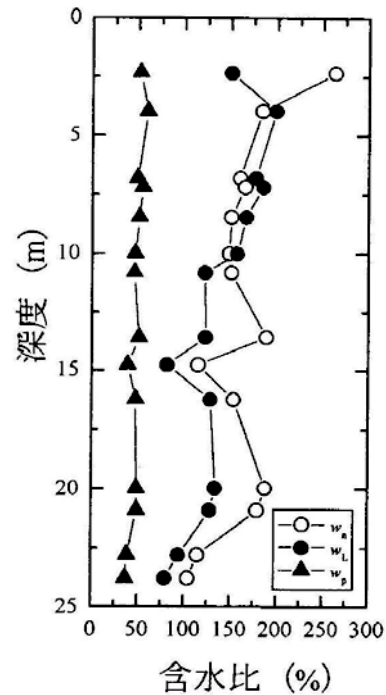


図-8 飯梨川デルタの自然含水比・液性限界・塑性限界の深度分布<sup>5)</sup>

成モデルに必要な土質定数 (圧縮指数  $\lambda$ 、膨潤指数  $\kappa$ 、比体積  $N$ 、圧縮側の限界状態での応力比  $M_c$ 、伸長側の限界状態での応力比  $M_E$  等) を PI のみから推定する方法を提案している (表-1)。ここで、 $N = (1 + e_0)$  は正規圧密曲線上での平均有効応力  $p' = 98 \text{ kPa}$  に対応する比体積である。この簡易土質定数推定法を用いた解析結果は要素試験<sup>15)</sup>、<sup>16)</sup> (三軸試験)、モデル実験<sup>14)</sup>、<sup>15)</sup> (遠心模型実験)、実地盤の変形挙動<sup>3)</sup>、<sup>4)</sup>、<sup>17)</sup> をよく表現できることが報告されており、本研究でもこの方法を用いて解析に必要な土質定数を推定した (表-2)。なお、透水係数  $k_{v0}$  の値は、参考文献<sup>18)</sup> を参照した。

正規圧密状態の粘性土地盤は一般に、液性指数  $IL \approx 1.0$  となり、深度が増すと伴に減少する傾向が認められる<sup>19)</sup>。簡易モデル化手法では、このことを考慮し、地盤の圧密

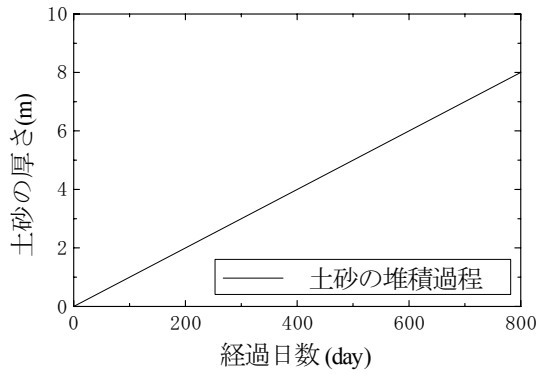


図-9 仮定した土砂堆積過程

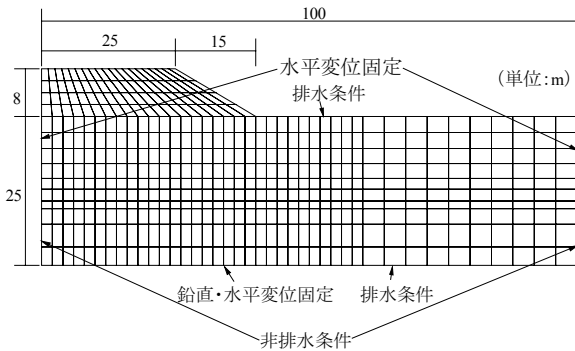


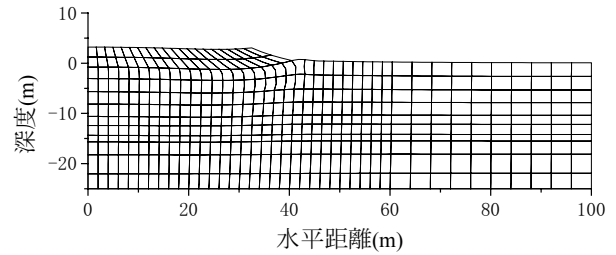
図-10 本解析に用いた有限要素分割と境界条件

状態を自然含水比と液性限界から判断しており、自然含水比が液性限界と同程度の場合には正規圧密状態、自然含水比が液性限界より低い場合には、過圧密状態と判断する。なお、自然含水比が液性限界より高い場合には、未圧密状態と判断する。

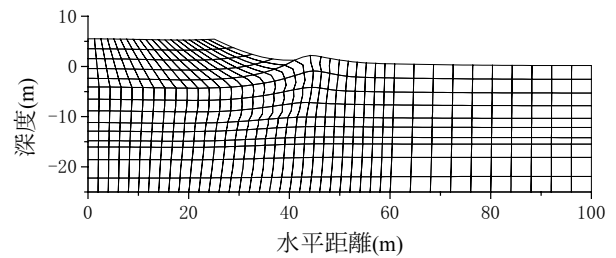
### 5. マッドランプおよびデルタのモデル化

自然含水比、液性限界、および塑性限界の深度分布(図-8)から飯梨川デルタの地盤の状態を推定する。図-8から10m以浅では自然含水比と液性限界の値がほぼ同じであることがわかる。また、10m以深では若干、自然含水比の値の方が大きい有意な差は認められない。よって、地盤の簡易モデル化手法により、飯梨川デルタの粘性土層は正規圧密状態であると考えられるため、全層にわたり正規圧密状態であると仮定した。

本研究ではデルタ先端に堆積する土砂を盛土の築造過程とみなした解析を行った。そのため、土砂堆積前の湖底面は水平面とした。しかし、堆積土砂に関する情報は得られていないため、一般的な土砂であると仮定し、単位体積重量  $19.6\text{kN/m}^3$ 、すなわち、水中重量を  $9.8\text{kN/m}^3$ 、弾性体としてのヤング率とポアソン比をそれぞれ



(a)土砂堆積 400 日後



(b)土砂堆積 800 日後

図-11 地盤の変状

$14.0\text{MN/m}^2$ 、 $0.34$  とした。一方、デルタの砂層の厚さに関して1991年に4.65m、1992年に8mであることがわかっている。ここから、土砂の堆積は1年に3.35mであると推測できるため、本研究での土砂の堆積過程は800日で8mの土砂が堆積するものとした(図-9)。

本研究で用いる有限要素法は、有限変形理論に基づき Sandhu and Wilson<sup>20)</sup>の方法に従って定式化している。要素は土骨格の変形に関して8節点アイソパラメトリック要素を用い、間隙水圧に関して4節点アイソパラメトリック要素を用いた。解析に用いた地盤の要素分割と境界条件を図-10に示す。全要素数は480個で、全節点数は1549個である。深度25m以深は基盤(シルト質砂～砂からなる更新統砂層で排水層と考えられる)が位置しており、変形が及ばないと考えられることから鉛直方向に関しては25mまでを解析領域とした。また、実際に形成されたマッドランプは沖合数十mに現れたことから水平方向に関しては解析領域幅がマッドランプの変形領域に影響を及ぼさないように100mを解析領域としデルタ層を25mとした。一方、変形に関する境界条件は、側面境界で水平変位固定、底面境界で鉛直・側方変位固定とし、水理条件に関しては側面境界では非排水条件、底面、表面で排水条件とした。

### 6. 解析結果とその評価

土砂堆積開始より400日経過後および800日経過後の地盤の変状を図-11に示す。なお、地盤の変形を明瞭にするため変位を3倍に拡大して表現した。土砂堆積開始



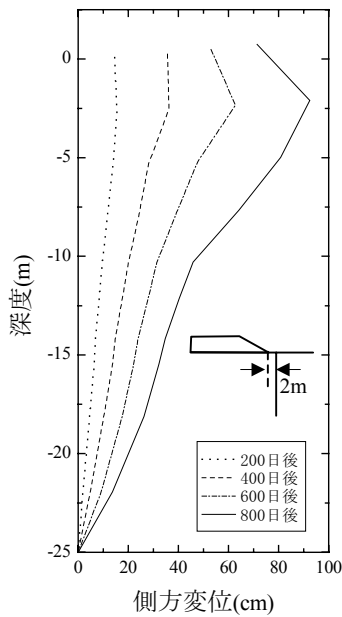


図-12 側方変位の深度分布

から 400 日後あたりまでは地盤の変形に特に大きな変化は見られなかったが、土砂の厚さが 4m となる土砂堆積開始から 400 日経過後 (図-11(a)) においてデルタ先端部分がわずかに沈降を始め、その前方にわずかな隆起が認められた。その後、土砂の厚さが 8m となる土砂堆積開始から 800 日経過後 (図-11(b)) では、デルタ先端に相当する土砂が傾斜して堆積している領域において軟弱粘土層は沈下の増大とともに沖合に向かい側方流動していることがわかる。一方で土砂堆積領域前面では、地盤が沖合に向かい側方流動するのに加えて隆起しており、デルタ下部の粘土層が回転運動の様相を示している。地盤の隆起が最大となった場所は、土砂の先端から 2m 程度の位置であったが、その隆起量は 73.6cm であった。このことから、マッドランプの形成には、堆積土砂前面の隆起に加えて側方流動も大きな影響を及ぼしているものと考えられる。

次に、地盤の側方変位に着目する。図-12 は、土砂堆積 800 日後に最大の隆起量が確認された土砂先端から水平距離およそ 2m 付近直下の側方変位の深度分布を示している。土砂堆積 200 日後では、地表面に近づくのに伴って水平変位は徐々に大きくなっており、最大で約 15cm の変位が認められた。土砂堆積 400 日後から 600 日後へと側方変位量は次第に大きくなる。最大値は深度 2.5m 付近で得られており、それぞれ 38cm, 63cm であった。土砂堆積 800 日後、最大変位量は 95cm に達している。ここで注目したいのは、深さ 10m 以浅から変位量が急に大きくなっているところである。本研究では、盛土にたとえた土砂の頂部に湖水面があると仮定しているため、変位量が急激に大きくなる境界部分、すなわち水面下約 18m にすべり面が存在している可能性がある。この深さ

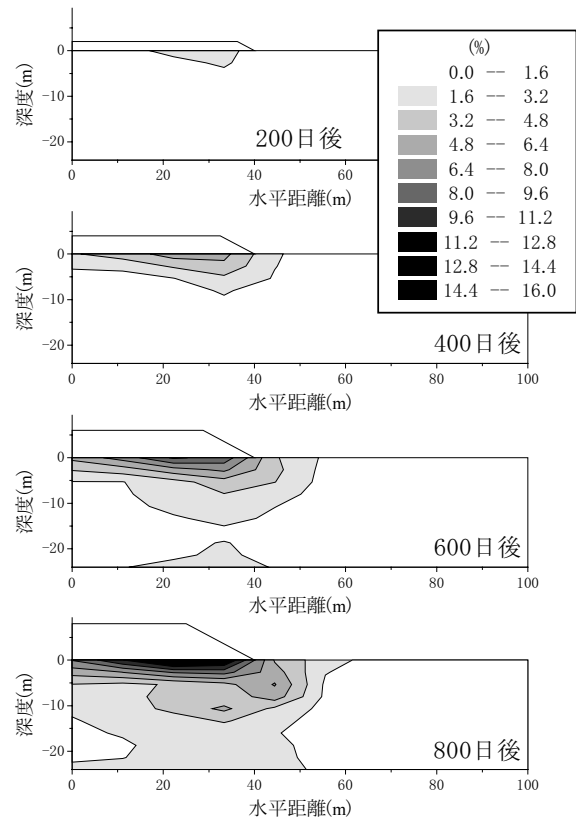


図-13 最大せん断ひずみ分布

は、実際のボーリング調査において、地層の傾斜が認められる部分と認められない部分の境界の深さとほぼ一致する。したがって、本解析結果はマッドランプを形成するすべり面の存在をうまく説明できている。

最後に、最大せん断ひずみ分布に着目する (図-13)。土砂堆積 200 日後ではデルタ先端部分下部、深度 3~4m の粘性土層まで 1.6~3.2%程度の最大せん断ひずみが発生した。土砂堆積 400 日後にはデルタ全体に 1.6~3.2%程度の最大せん断ひずみが発生しており、その最大の深度は 10m 付近である。土砂堆積 600 日後では 1.6~3.2%程度の最大せん断ひずみは深さ 14m 付近にまで達し、その最大せん断ひずみの分布が円弧状になっていることがはっきりとわかる。最終的に土砂堆積 800 日後、1.6~3.2%程度のひずみは基盤近くにまで達し、地表面付近の最大せん断ひずみは 14.7%程度であった。したがって、土砂の堆積に伴うデルタの下に広がる軟弱粘性土地盤の変形挙動は最大ひずみの分布が円弧状になっていることから一部のみが変位するのではなく、地盤全体が円弧すべり的に変状した結果であると考えられ、このマッドランプの形成過程は、逆断層によって変位した円弧すべり的な破壊現象であるという報告<sup>5)</sup>に調和的である。

一般的に変形解析で得られた結果は変形挙動の実測値と比較することで評価される。しかし、本研究では実測値が得られておらず、このような場合には、変形解析で得られた結果の信頼性を評価することは困難である。し

かし、円弧すべり現象に伴ってマッドランプが形成されたという今回の変形解析結果の信頼性は、ボーリング調査で得られたアカホヤ火山灰層の繰り返しの情報や、地層の上部には傾斜が認められるのに対し、下部ではそれが認められないという地球科学的な情報などと併せることによって、十分に評価が可能であると考えられる。

以上のことから、地盤変形解析を用いて実測値が得られていないような自然現象の形成過程を評価する場合には、鍵層を含んだ層序の繰り返しなどの地球科学的な情報を利用することで有意な評価ができる可能性を示唆した。

## 7. 結論

本研究では、河川河口部の前面に自然現象として出現するマッドランプの形成過程を簡易変形解析手法に基づいた有限変形有限要素解析によってシミュレートした。その結果、マッドランプの形成が円弧すべり現象に伴う堆積土砂前面の隆起による可能性を示すとともに、マッドランプ形成のような計測データのない自然現象の形成過程を解明しようとする際には、鍵層や層序といった地球科学的な情報と併せることが極めて有意な評価が可能となる場合があることを示唆した。

## 参考文献

- 1) Sakajo, S. and Kamei, T.: A simple procedure for evaluating deformation characteristic of deep clay foundation under embankment using elasto-plastic model, *Proceeding of the International Symposium on Compression and Consolidation of Clayey Soils, IS-Hiroshima '95.*, Vol.1, pp.739-744, 1995.
- 2) Kamei, T. and Sakajo, S.: Simplified deformation analysis of clay foundation under embankment using elasto-viscoplastic model, *Memoirs of the Faculty of Science, Shimane University*, Vol.29, pp.51-72, 1995.
- 3) Sakajo, S. and Kamei, T.: Simplified deformation analysis for embankment foundation using elasto-plastic model, *Soils and Foundation*, Vol.36, No.2, pp.1-11.1996
- 4) Kamei, T. and Sakajo, S.: A deformation analysis of deep foundation under embankment using an elasto-viscoplastic model, *Journal of the Japan Society of Engineering Geology*, Vol.39, No2, pp.183-92.1998.
- 5) 島根大学汽水域研究センター:マッドランプー中海, 飯梨川河口ー, 島根大学汽水域研究センター特別報告第1号, 1994.
- 6) Morgan, J. P., Coleman, J. M. and Gagliano, S. M.: Mudlumps at the mouth of south pass, Mississippi river, *sedimentology, paleontology, structure, origin, and relation to deltaic processes*, Louisiana State Univ., *Costal Studies Series* No.10, 190p., 1963.
- 7) Morgan, J. P., Coleman, J. M. and Gagliano, S. M.: Mudlumps: Deltaic structure in Mississippi delta sediments, *AAPG Memoir*, Vol.8, pp.145-161, 1968.
- 8) Miffilin, M. D.: Mudlumps and suggested genesis in Pyramid Lake, Nevada *Int. Assoc. Sci. Hydrol., Symposium of Bucarest*, pp.75-88, 1970 .
- 9) 町田 洋, 新井房夫: 火山灰アトラス [日本列島とその周辺], 東京大学出版, p.276, 1992.
- 10) Roscoe, K. H., Schofield, A. N. and Wroth, C. P.: On the Yielding of soils, *Geotechnique*, Vol.8, No.2, pp.22-53, 1958.
- 11) Roscoe, K. H., Schofield, A. N. and Thurairajha, A.: Yielding of clays in states wetter than critical, *Geotechnique*, Vol.13, No.3, pp.211-240, 1963.
- 12) Schofield, A. N. and Wroth, C. P.: *Critical State Soil Mechanics*, McGraw-Hill, 370p., 1968.
- 13) Yatomi, C. Yashima, A., Iizuka, A., and Sano, I.: General theory of shear bands formation by a non-coaxial Cam-clay model, *Soils and Foundations*, Vol.29, No.3, pp.41-53, 1989.
- 14) Kamei, T.: A study on the mechanical behavior of normally consolidated cohesive soils, *thesis presented to the Tokyo Institute of Technology*, at Tokyo, Japan, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor Engineering, 340p., 1985.
- 15) Kamei, T.: An integrated evaluation of the mechanical behavior of normally consolidated cohesive soils, *Geological reports of Shimane University*, No.14, pp.1-14, 1997.
- 16) Nakase, A. Kamei, T. and Kusakabe, O.: Constitutive parameters estimated by plasticity index, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol.114, No.7, pp.884-858, 1988.
- 17) 亀井健史, 珠玖隆行, 志比利秀: Cam-clay 有限変形解析によるマレーシア軟弱海成粘土地盤上に建設された試験盛土の力学的挙動の評価, 地盤工学ジャーナル, Vol.1, No.3, pp.71-83, 2006.
- 18) 亀井健史: ジオテクノート2 中間土ー砂か粘土かー, (社)地盤工学会, pp.7-54, 1992.
- 19) 中瀬明男: 新体系土木工学 84 海洋土質, p.124, 1984.
- 20) Sandhu, R. S. and Wilson, E. L.: Finite element analysis of flow in saturated porous media, *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, Vol.95, No.EM3, pp.641-652, 1969.

(2010年6月28日 受付)