

# 海成沖積粘性土の年代効果と圧縮形態

乗安直人<sup>1</sup>・兵動正幸<sup>2</sup>・三浦哲彦<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 中電技術コンサルト(株) 山口支社部長 (〒754 山口県吉敷郡小郡町下郷 1225-9)

<sup>2</sup>正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科 (〒755 山口県宇部市常盤台)

<sup>3</sup>正会員 工博 佐賀大学教授 理工学部都市工学科 (〒840 佐賀市本庄町1番地)

本論文は、広範囲な塑性指数域の海成沖積粘性土を対象に年代効果の圧縮特性に及ぼす影響の程度とメカニズムについて実際の圧縮曲線形態から解明するために基礎的調査を実施した。本研究において塑性指数の影響が小さい  $\log f \sim \log p$  関係に基づく対数圧縮指数  $Cc^* \sim f$ 、 $Cc^* \sim p_m$  の関係を採用した。①  $p_c$  近傍で下位・上位降伏点が存在し、上位降伏点は年代効果・土構造の破壊の開始点に関係する。②年代効果の発現は圧縮曲線形態に影響を及ぼし、対数圧縮指数比  $Rc$  が有効土被り圧の増大に伴いと大きくなる。③  $Rc=1.0$  の基準圧縮形態が  $1p$  に対応して限界有効土被り圧で存在する。④粘性土の年代効果の程度は  $Rc$  により把握できる。⑤ Bjerrum の年代効果モデルの基本的仮定を検証した。

**Key Words :** *aging, cementation, compression, consolidation yield stress, delayed compression, marine clay, soil structure*

## 1. まえがき

長年月堆積した粘性土地盤において遅延圧密、セメンテーション等の年代効果が状態境界面、応力・ひずみ関係に大きな影響を及ぼすことが知られている<sup>1)2)3)</sup>。年代効果の発現は、塑性指数  $I_p$  が大きく異なる粘性土において大きく異なることが報告されている。近年、年代効果の再現の方法として高温再圧密による方法が提案されている<sup>4)</sup>が、その前提となる粘性土の年代効果の発現・土構造の形成を定量的に把握する方法は、特に  $I_p$  が異なった場合後述するように、適正に評価できていない<sup>5)6)7)</sup>。年代効果の発現によって粘性土の圧縮・せん断特性は大きな影響を受けており、実務工学上、 $I_p$  等の物性が大きく異なった場合に個別な粘性土の年代効果の発現を定量的に評価することが重要である。

これまで年代効果の発現は、一般には圧密降伏応力  $p_c$  と有効土被り圧  $p_o$  との比較<sup>1)2)4)</sup>や  $p_c$  近傍の上位応力での最大圧縮指数  $C_{cmax}$ 、圧縮指数比  $\gamma$ <sup>4)</sup>に着目されて評価されてきた。これらは  $e \sim \log p$  関係における圧縮曲線の形態の変化に着目したものである。 $I_p$  が大きく異なった場合、圧縮曲線の形態が地盤中で有効土被り圧  $p_o$  の増大の下で実際にどのように変化しているか、定量的観点から評価された事例は極めて少ないように考える。年代効果の発現・土構造の形成は、圧縮曲線の形態に大きな影響を与えていることが推定されるため、地盤中でのこれら圧縮曲線の形態の変化を定量的に評価することが重要である。年代効果を定

量的に評価する上でその情報を多くもっているのは実際の地盤であり、地盤中での圧縮曲線を調査し、その形態の変化に一定の基準が明らかになれば、圧縮曲線の形態の変化から年代効果の発現過程を明らかにすることができるだけでなく、施工後の土構造の形成に伴う地盤特性の変化を予測する指標にできる。このような意味で実際の粘性土における圧縮曲線の形態の変化を調査することが重要である。

$e \sim \log p$  圧縮曲線は、塑性指数  $I_p$  が大きく異なった場合、 $I_p$  により大きな影響を受けるほか、圧密圧力の増大に伴い圧縮指数  $Cc$  は  $C_{cmax}$  を示した後も 1,000kPa 程度の最終圧密圧力まで低下傾向にあるため、定量的な評価を困難にしている<sup>7)</sup>。また、土構造形成の影響を評価する上で前述した  $p_c$ 、 $C_{cmax}$  に着目する方法は、それぞれの圧密圧力が異なっており、どちらが土構造の影響を評価する上で適正か否かについて十分な議論がされていない。具体的に述べると土構造の形成の影響が  $C_{cmax}$  に大きく現れることは、 $e \sim \log p$  関係にもその影響が現れることを意味しており、従来  $p_c$  に着目し土構造の影響を評価する方法は  $C_{cmax}$  と比べて圧縮時の土構造の変形過程においてどのような物理的意味があるかを評価する必要がある。

Bjerrum<sup>1)2)</sup>は、年代効果について“概念モデル”を提案しており、遅延圧密がセメンテーションと独立に(体積圧縮曲線の形状を変えることなく)無限に進行するとしている。当 Bjerrum モデルは、同様に圧縮曲線の形態の変化に着目したものであるため、実際の圧縮曲線の形態変化からその基本的仮定を検証する必要がある。

本研究は、以上の観点から塑性指数の範囲が大きく異なる瀬戸内海の高塑性粘土を選び、 $I_p$ の相違による $e \sim \log p$ および $\log f \sim \log p$ 圧縮曲線への影響を調査し、 $\log f \sim \log p$ 圧縮曲線の形態(以降“圧縮形態”と呼ぶ)の変化の実態から年代効果の発現(土構造の形成)過程が粘性土の圧縮形態に及ぼす影響を定量的に評価する手法を提案し、年代効果のメカニズム等に関して基礎的調査を実施したものである。ここで、Burland<sup>9)</sup>は“土構造(Soil structure)”について骨組構造(Soil fabric)とボンディング(Bonding)を含めたものとして用いており、ここで用いる“土構造”は同様にこれらを含めたものとして用いた。特に、本研究における調査対象地点の高塑性の粘性土<sup>7)</sup>は表層付近で土構造の未成熟な粘性土が堆積しており、ここで用いた“土構造”は地盤中における未成熟の段階からの形成過程を含めたものとして用いた。また、ここで用いた圧縮曲線は、全て自然堆積粘性土のものである。実地盤においては、後述するように $I_p$ が同じであれば粘性土の圧縮形態は有効土被り圧 $p_0$ の増加により膨潤圧縮曲線から正規圧縮曲線まで連続的に変化する傾向を示し、自然堆積地盤において土構造を評価する上で試験室における再構成粘性土(構造のない粘性土とされている)の圧縮曲線を基準にすることの意味が曖昧であることや、ここでは特に自然堆積地盤における土構造の形成過程全般を評価することに重点を置いたため、本研究では再構成粘性土(構造のない粘性土)を基準に年代効果を評価する方法は採用していない。

## 2. 調査地点の地盤工学的特性

我が国において工学的に取り扱う海成沖積粘性土は、塑性指数 $I_p$ が広範囲に及んでおり、強度特性および圧縮特性などの地盤工学的特性が大きく異なる。これは、粘性土の物性そのものの影響のみならず年代効果の発現も大きく異なるためであると想定される。したがって、本研究では塑性指数 $I_p$ の範囲が大きく異なる地盤をとりあげ、年代効果の発現状況を調べることにした。本研究における対象地盤は、瀬戸内海の埋立て前の柳井地点(埋立て面積50ha)および広島地点(埋立て面積130ha)の海成沖積粘性土であり<sup>10)</sup>、当塑性指数は25~105の範囲に及ぶ。

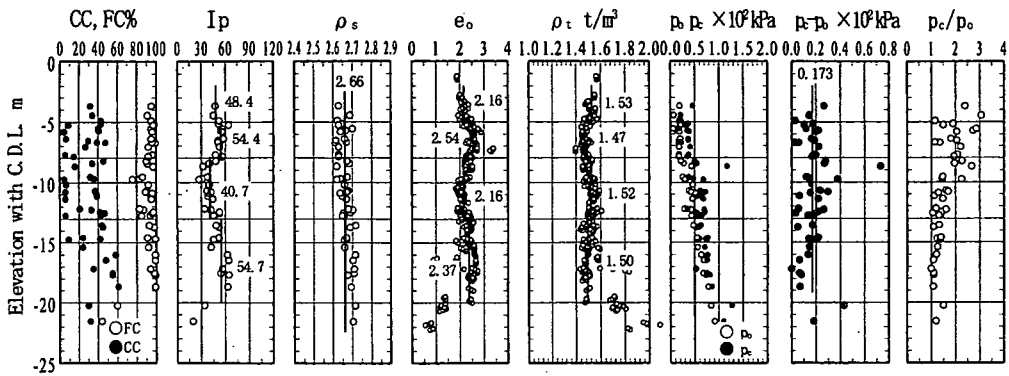
2地点の地盤工学的特性を図1, 2に示した。図中の $Cc^*_{10}$ は、 $\log f \sim \log p$ 関係における圧密降伏応力 $p_c$ 近傍の対数圧縮指数 $Cc^*$ で、一般に用いられている $e \sim \log p$ 関係における $p_c$ 近傍の最大圧縮指数 $Cc_{max}$ に相当するものである。ここで、対数圧縮指数 $Cc^*$ は、 $\log f \sim \log p$ 関係の勾配 $Cc^* = \Delta \log f / \Delta \log p$ を示す。 $f$ は体積比 $1+e$ である。また、 $Cc^*_{max}$ は標準圧密試験で一般に500~1,000kPaの最終圧密圧力における対数圧縮指数で、ほぼ収束値に近い値を示す。柳井沖積粘性土は、海底面CDL-1m~4m下に層厚15~

18mで分布しており、その塑性指数 $I_p$ は25~64の範囲(平均 $I_p=48.6$ )で、深度方向に $I_p$ が同じ分布形状をしており、埋立て地域においてはほぼ水平方向に一樣な地盤を形成している。湿潤密度 $\rho_w$ は1.47~1.53t/m<sup>3</sup>、圧密降伏応力 $p_c$ と有効土被り圧 $p_0$ の差( $p_c - p_0$ )は深度方向にほぼ一樣であり、平均17.3kPaである。一方、広島沖積粘性土は、海底面CDL-10m~15m下に層厚12~16mで分布しており、その塑性指数 $I_p$ は40~105の範囲(平均 $I_p=84$ )で、深度方向に $I_p$ が同じ分布形状をしており、埋立て地域においてはほぼ水平方向に一樣な地盤を形成している。湿潤密度 $\rho_w$ は1.37t/m<sup>3</sup>、圧密降伏応力 $p_c$ と有効土被り圧 $p_0$ の差( $p_c - p_0$ )は深度方向に一樣であり、平均8.0kPaである。柳井地点の粘性土は、広島地点と比べて塑性指数 $I_p$ が低目で約6割、湿潤密度が大きく、( $p_c - p_0$ )が約2倍、一軸圧縮強度 $q_u$ も約2倍と大きく、破壊ひずみ $\epsilon_f$ が小さくなっている。広島地点の粘性土は高塑性であり、年代効果の発現が小さく、破壊ひずみ $\epsilon_f$ が大きく、強度が小さい超軟弱粘性土を形成している。両地点の海成沖積粘性土は、物性のみならず年代効果発現が大きく異なったものとなっている。

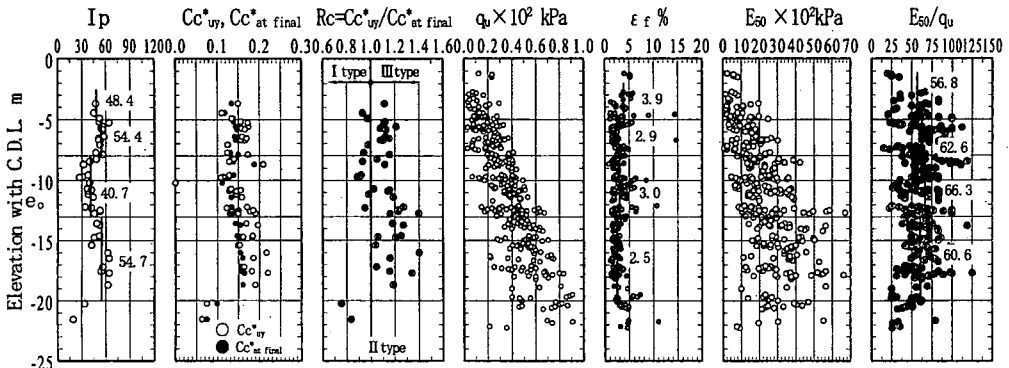
## 3. $I_p$ による $e \sim \log p$ , $\log f \sim \log p$ 関係への影響

Terzaghiが圧密理論を構築して以来、粘性土の圧縮特性は間隙比と載荷圧の関係である $e \sim \log p$ 関係により評価されてきた<sup>9)</sup>。また、長年月堆積による遅延圧密やセメンテーション等年代効果が粘性土の圧縮・せん断特性に及ぼす影響を評価する場合においても、同様に $e \sim \log p$ 関係が広く使われてきた<sup>7)</sup>。年代効果の影響は $e \sim \log p$ 等の圧縮関係の変化として認識されるが、年代効果の影響以外に、塑性指数 $I_p$ の程度が $e \sim \log p$ 関係に影響を及ぼすために、年代効果・土構造そのもの間隙比 $e$ または体積比 $f \sim$ 圧力 $p$ 関係(圧縮形態)に及ぼす影響を定量的に把握することが困難となる。また、高塑性と低塑性粘性土における年代効果発現の相違を比較できない恐れがある。

これまで年代効果・土構造の影響の解明は、塑性指数 $I_p$ の範囲が限定された粘性土で行われるか、または定性的な評価が一般的であったと思われる。実際の沖積粘性土において年代効果・土構造がどの程度発現し、地域的にその程度が異なっているかを定量的に説明したものは見られない。したがって、実際の広範囲な塑性指数域からなる沖積粘性土において、年代効果・土構造の影響を定量的に評価する手法を確立することが重要である。特に、我が国の沿岸域に堆積する沖積粘性土の $I_p$ は種々異なっているため、 $I_p$ が $e \sim \log p$ 等関係に及ぼす影響を明らかにし、その上で $I_p$ の影響を受けない圧縮関係を採用する必要がある。

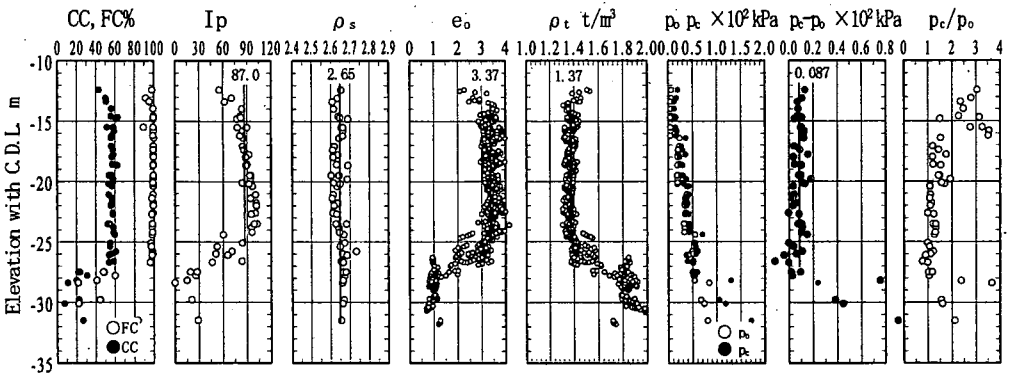


(a) CC, FC,  $I_p$ ,  $\rho_s$ ,  $e_0$ ,  $\rho_t$ ,  $p_0 \cdot p_c$ ,  $(p_c - p_0)$ ,  $p_c/p_0$  ~ 標高関係図

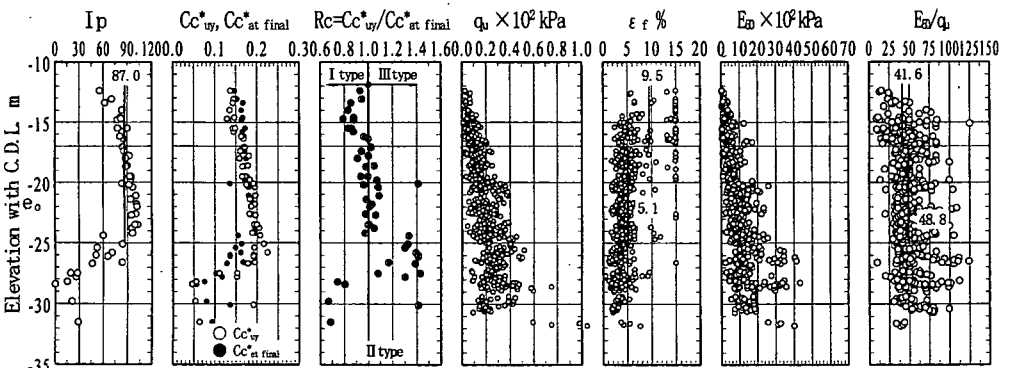


(b)  $I_p$ ,  $C_c^*_{uy}$ ,  $C_c^*_{at final}$ ,  $R_c$ ,  $q_u$ ,  $\epsilon_f$ ,  $E_{50}$ ,  $E_{50}/q_u$  ~ 標高関係図

図-1 柳井地点における地盤工学特性



(a) CC, FC,  $I_p$ ,  $\rho_s$ ,  $e_0$ ,  $\rho_t$ ,  $p_0 \cdot p_c$ ,  $(p_c - p_0)$ ,  $p_c/p_0$  ~ 標高関係図



(b)  $I_p$ ,  $C_c^*_{uy}$ ,  $C_c^*_{at final}$ ,  $R_c$ ,  $q_u$ ,  $\epsilon_f$ ,  $E_{50}$ ,  $E_{50}/q_u$  ~ 標高関係図

図-2 広島地点における地盤工学特性

(1)  $I_p$ による $e \sim \log p$ ,  $\log f \sim \log p$  関係特性の調査方法

当調査地点の試料の中で広範囲な塑性指数域から成る標準圧密試験結果を $e \sim \log p$ 関係と $\log f \sim \log p$ 関係でそれぞれ表し、図3、4に示した。これらの関係から $I_p$ が高い場合、初期間隙比または初期体積比が大きく、500~1,000kPaの最終圧密圧力付近の塑性域は $\log f \sim \log p$ 関係では直線形状に近いが、 $e \sim \log p$ 関係では逆反りの形状が見られる。一般に、年代効果・土構造の違いが $e \sim \log p$ 関係と $\log f \sim \log p$ 関係に及ぼす影響は、圧密降伏応力 $p_c$ 近傍で大きく、圧密圧力 $p$ の増大により減少することが明らかになっている<sup>10)</sup>。したがって、ここで圧密圧力 $p$ が十分に大きく年代効果の影響がなくなったと推定される状態<sup>10)</sup>

で、 $I_p$ による $e \sim \log p$ 関係と $\log f \sim \log p$ 関係への基本的影響を調べることにした。ここでは、標準圧密試験における最終平均圧密圧力より1段階小さい平均圧密圧力 $p_m=470$  kPaと最終平均圧密圧力 $p_m=940$ kPaで $e \sim \log p$ 関係から得られる圧縮指数を $Cc_{4.7}$ ,  $Cc_{9.4}$ で表し、これらの比 $Cc_{4.7}/Cc_{9.4}$ と $I_p$ との関係を図5に示した。同様に $\log f \sim \log p$ 関係により得られる対数圧縮指数を $Cc^*_{4.7}$ ,  $Cc^*_{9.4}$ で表し、これらの比 $Cc^*_{4.7}/Cc^*_{9.4}$ と $I_p$ との関係を図6に示した。また、 $e \sim \log p$ 関係により得られる $Cc_{4.7}$ ,  $Cc_{9.4}$ と $I_p$ との関係、 $\log f \sim \log p$ 関係により得られる $Cc^*_{4.7}$ ,  $Cc^*_{9.4}$ と $I_p$ との関係をそれぞれ図7、8に示した。ここで、圧縮指数比 $Cc_{4.7}/Cc_{9.4}$ と対数圧縮指数比 $Cc^*_{4.7}/Cc^*_{9.4}$ は、それぞ

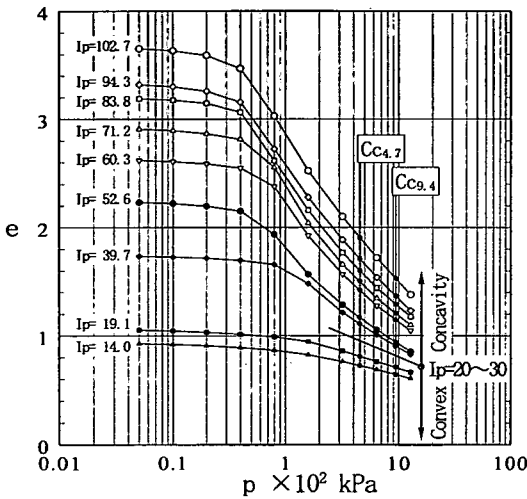


図3 広範囲な $I_p$ における $e \sim \log p$ 関係

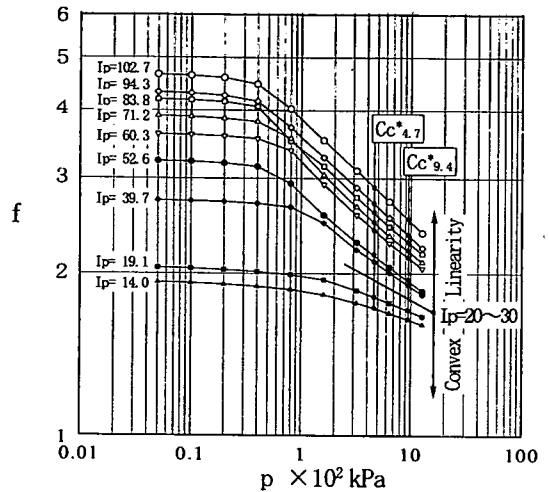


図4 広範囲な $I_p$ における $\log f \sim \log p$ 関係

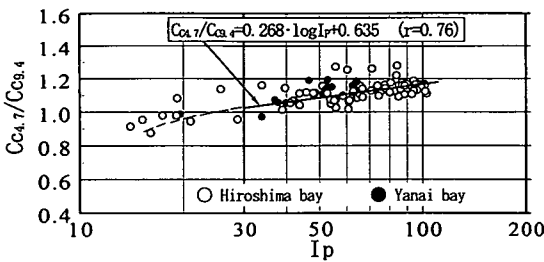


図5  $Cc_{4.7}/Cc_{9.4} \sim I_p$ 関係

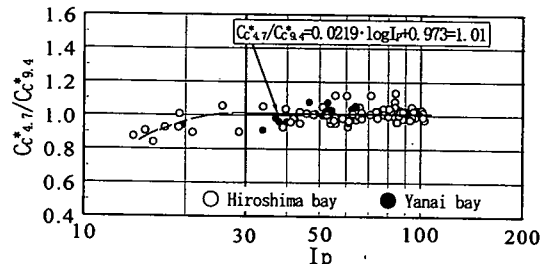


図6  $Cc^*_{4.7}/Cc^*_{9.4} \sim I_p$ 関係

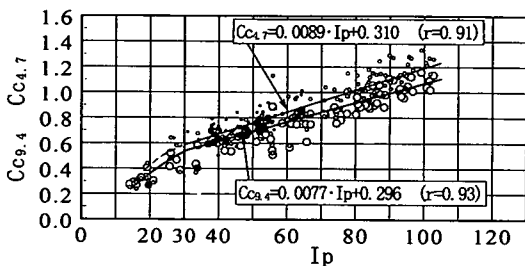


図7  $Cc_{4.7}$ ,  $Cc_{9.4} \sim I_p$ 関係

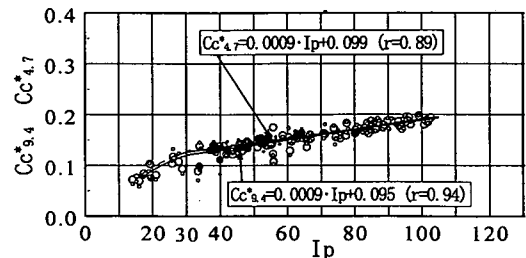


図8  $Cc^*_{4.7}$ ,  $Cc^*_{9.4} \sim I_p$ 関係

れ  $e \sim \log p$  関係,  $\log f \sim \log p$  関係曲線の最終圧密圧力付近での形状を表す指標で, 各圧縮指数比が 1.0 の場合は直線形状を表し, 各圧縮指数比  $> 1.0$  の場合は下に凹な非直線形状, 各圧縮指数比  $< 1.0$  の場合は上に凸な非直線形状を表す。

ここで,  $C_c$ ,  $C_c^*$  への影響を評価するために塑性指数  $I_p$  を選んだ理由は, 塑性指数  $I_p$  の圧縮曲線への影響が顕著であることが示されているほか,  $I_p$  が一般に粘性土の地盤工学特性の分類に使用されており, 広範囲な塑性指数  $I_p$  における粘性土, 中間土および砂の領域の区分と  $C_c$ ,  $C_c^*$  との対応関係が容易であること<sup>13)</sup>,  $I_p$  が従来用いられてきたように液性限界  $w_L$ , 湿潤密度  $\rho_t$  等と強い相関性を示すこと<sup>14)</sup>, 更に  $I_p$  が粘性土の攪乱した状況での指標を示すことから, 高い圧密圧力により初期構造が破壊された粘性土の圧縮特性等物性と対応をとることができるためである。

## (2) $I_p$ による $e \sim \log p$ 関係への影響

$e \sim \log p$  関係において, 標準圧密試験の最終圧密圧力付近における曲線の勾配 (圧縮指数) が圧密圧力  $p$  に対して直線関係, すなわち  $C_{c4.7}/C_{c9.4} = 1.0$  を示すのは図-5 より  $I_p$  が 20~30 の極めて限定された範囲であることがわかる。 $I_p \geq 20 \sim 30$  において, 最終圧密圧力付近の曲線は  $C_{c4.7}/C_{c9.4} > 1.0$  となり, 下に凹な非直線形状を示す。比  $C_{c4.7}/C_{c9.4}$  は, 図-5 に示すように  $\log I_p$  に比例して大きくなる傾向が認められる。これらの特性は,  $e \sim \log p$  関係そのものによるものと判断できる。従来, 粘性土の圧縮およびせん断モデルの構築に際し,  $e \sim \log p$  関係において圧密降伏応力  $p_c$  を境に弾性域および塑性域の直線性を仮定しているが, 高塑性指数域の粘性土においては一般に無視できないほどに非直線性の程度が大きくなる。また, 従来年代効果においてセメンテーション効果は塑性域の凹型非直線性の程度を大きくする<sup>15)</sup>ことが示されているが, 一般に  $I_p$  が大きくなるほど塑性域の凹の程度が増加し,  $I_p = 100$  程度の粘性土では  $C_{c4.7}/C_{c9.4}$  が 1.2 程度となるため,  $e \sim \log p$  関係では年代効果そのものの変化に及ぼす影響を正確に評価することができない。また, この付随的性質として  $p_c$  近傍で必ず最大圧縮指数  $C_{cmax}$  が存在する。

また,  $I_p \geq 20 \sim 30$  のほとんどの  $I_p$  で, 図-5 に示すように  $C_{c4.7}/C_{c9.4}$  が 1.0 を上回りかつ  $\log I_p$  に比例して大きくなっており, 圧縮指数  $C_c$  は圧密圧力の増加により減少し, 収束する傾向を示さない。これは, 図-7 において  $C_{c9.4}$  が  $C_{c4.7}$  より小さく, かつ  $\log I_p$  に比例してその差が大きくなっていることから判断できる。

一方,  $I_p < 20 \sim 30$  の低塑性指数域において最終圧密圧力付近の曲線は  $R_c$  が 1.0 以下で上に凸な非直線形状を示す。一般に中間土において砂分の割合が多くなると,  $e \sim \log p$  関係において  $I_p$  の低下に従い初期体積比  $f_0$ ,  $C_c$  の急激な低下と共に  $C_{c4.7}/C_{c9.4}$  は図-5 に示すように 1.0 を大きく下回り非直線性の程度が大きくなる傾向を示す。

以上,  $e \sim \log p$  関係の基本的特性は, 標準圧密試験における最終圧密圧力付近で非直線性の程度は  $I_p$  に依存して大きくなり, かつ圧縮指数  $C_c$  は圧密圧力により減少し, 収束する傾向を示さない。このことより,  $e \sim \log p$  関係では,  $I_p$  が大きい程, 年代効果の影響そのものを評価することが困難になる。

## (3) $I_p$ による $\log f \sim \log p$ 関係への影響

$\log f \sim \log p$  関係の標準圧密試験における最終圧密圧力付近の対数圧縮指数は以下のような特性を示す。 $I_p \geq 20 \sim 30$  の広範囲な  $I_p$  において最終圧密圧力付近の塑性域は, 図-6 に示すように  $C_{c4.7}^*/C_{c9.4}^*$  が平均して見るとほぼ 1.0 であり, 直線性を示す。したがって,  $\log f \sim \log p$  関係は  $I_p$  そのものによる影響を基本的に除去できる。また, このことより最終圧密圧力付近における対数圧縮指数  $C_{c^*}$  at final はほぼ一定値に収束していると判断できる。これは, 図-8 において  $C_{c4.7}^*$  が  $C_{c9.4}^*$  とほぼ一致していることから判断できる。すなわち,  $I_p > 20 \sim 30$  における  $C_{c4.7}^*/C_{c9.4}^* = 1.0$  は, 圧縮性に及ぼす  $I_p$  による影響を除去できるのみならず,  $C_{c^*}$  の収束性を同時に示している。ここで,  $C_{c9.4}^*$  は, 図-4 に示す  $\log f \sim \log p$  関係から明らかのように,  $f$  が 1.6~2.5 と大きく減少した状況における対数圧縮指数を示す。

一方,  $I_p < 20 \sim 30$  において最終圧密圧力付近の塑性域は,  $e \sim \log p$  関係同様に上に凸な非直線性を示す。一般に中間土において砂分の割合が多くなると,  $\log f \sim \log p$  関係においても非直線性の程度を示す  $C_{c4.7}^*/C_{c9.4}^*$  は, 図-6 に示すように  $e \sim \log p$  関係同様に  $I_p$  の低下に従い急激に小さくなる。したがって,  $\log f \sim \log p$  関係において最終圧密圧力付近が直線性を示す限界は  $I_p = 20 \sim 30$  であり, また  $I_p < 20 \sim 30$  において中間土または砂材料として粒状体の粒子構造が現れるため非直線性を示すものと考えられる。一般にこれらの地盤材料は初期体積比が小さく, 年代効果・土構造の圧縮特性に及ぼす影響そのものも小さくなるものと推定される。

以上,  $\log f \sim \log p$  関係の基本的特性は,  $I_p \geq 20 \sim 30$  の広範囲な  $I_p$  において最終圧密圧力付近の  $C_{c^*}$  は  $I_p$  によらず概略直線性を示し, かつ一定値に収束する傾向を示す。これらの結果から,  $\log f \sim \log p$  関係を用いれば, 広範囲な塑性指数域において  $I_p$  の程度に影響されずに年代効果・土構造そのもの影響を評価できる。さらに圧密降伏応力近傍における年代効果・土構造の圧縮特性に及ぼす影響は, 収束する  $C_{c^*}$  を基準に定量的に評価することができる。したがって, 本研究では, 以降  $\log f \sim \log p$  関係を基本に年代効果・土構造について調べた。

#### 4. 下位・上位降伏点の存在とその物理的意味

##### (1) $Cc^* \sim f$ , $Cc^* \sim p_m$ , $Cc^* \sim p_m/p_c$ 関係

広範囲な  $I_p$  について、 $\log f \sim \log p$  関係曲線の各荷重段階における接線勾配 (対数圧縮指数)  $Cc^*$  の体積比  $f$  および  $p_m/p_c$  ( $p_m$ : 平均圧密荷重) に対する関係  $Cc^* \sim f$ ,  $Cc^* \sim p_m/p_c$  関係を図-9 (a), (b) にそれぞれ示した。また、広範囲な  $I_p$  の中から  $I_p$  が 78~85 とほぼ同一で有効土被り圧  $p_0$  の異なる場合の  $\log f \sim \log p$ ,  $Cc^* \sim f$ ,  $Cc^* \sim p_m$ ,  $Cc^* \sim p_m/p_c$  関係を図-10~13 にそれぞれ示した。ここに示す  $Cc^* \sim f$ ,  $Cc^* \sim p_m$  ( $p_m/p_c$ ) 関係は、 $\log f \sim \log p$  関係を各荷重段階におけ

る対数圧縮指数  $Cc^*$  と体積比  $f$ 、圧密圧力  $p_m$  に対する関係に変換したものである。図-10 に示す  $\log f \sim \log p$  関係においては、有効土被り圧  $p_0$  による圧縮曲線 (圧縮形態) の変化はわずかで年代効果の影響を読み取りがたいが、図-11~13 に示す  $Cc^*$  に関する各関係においては大きな変化となって現れる。したがって、ここに示す  $Cc^*$  に関する各関係は、年代効果・土構造による  $\log f \sim \log p$  関係への影響を  $\log f \sim \log p$  関係そのものより詳細に把握することができる。

また、参考のために図-9 (a), (b) と同じデータについて  $e \sim \log p$  関係曲線の各荷重段階における圧縮指数  $Cc$  の間隙比  $e$  および  $p_m/p_c$  に対する関係  $Cc \sim e$ ,  $Cc \sim p_m/p_c$  関係を

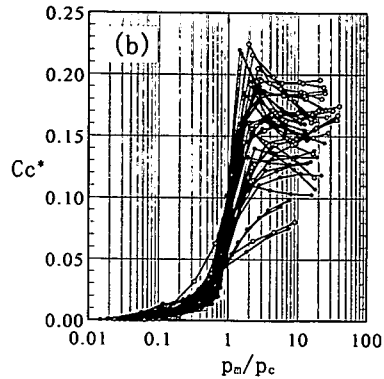
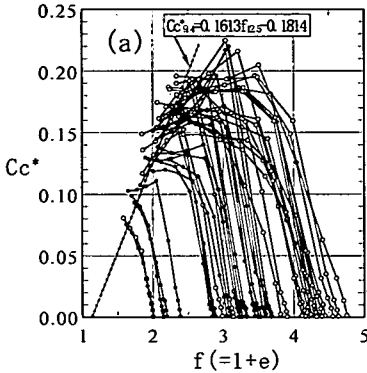


図-9 広範囲な  $I_p$  における  $Cc^* \sim f$ ,  $Cc^* \sim p_m/p_c$  関係 ( $\log f \sim \log p$  関係)

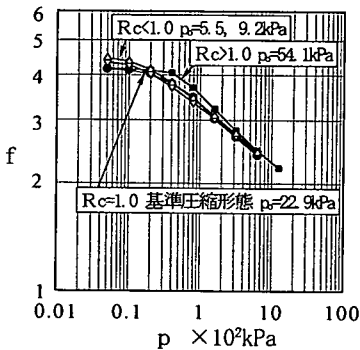


図-10  $\log f \sim \log p$  関係 (同一  $I_p$ )

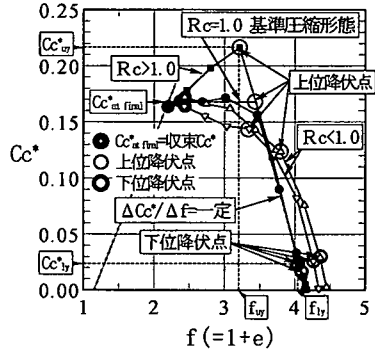


図-11  $Cc^* \sim f$  関係 (同一  $I_p$ )

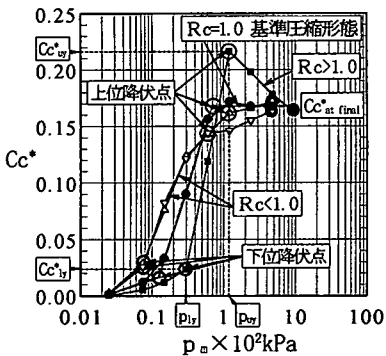


図-12  $Cc^* \sim p_m$  関係 (同一  $I_p$ )

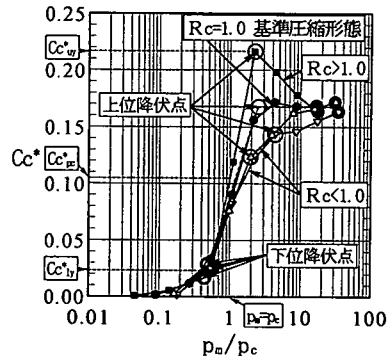


図-13  $Cc^* \sim p_m/p_c$  関係 (同一  $I_p$ )

図-14 (a), (b)に示した、 $e \sim \log p$  関係においては、図-14 (a), (b)に示すように初期間隙比  $e_0 \leq 1.0 \sim 1.2$  を除き、 $C_c$  は  $p_m/p_c = 1.5 \sim 4.0$  付近でピーク値  $C_{cmax}$  が存在し、その後一定値を示すことなく全て圧密圧力の増大に伴い低下し、最終圧密圧力付近においても低下し続ける。これは前節で述べたように  $C_c$  が最終圧密圧力付近で圧力に依存して減少し、収束しないことを示す。一方、 $\log f \sim \log p$  関係においては、図-11, 図-9 (a)に示すように  $I_p$  が等しければ最終圧密圧力付近で  $C_c^*$  はほぼ一定値に収束する傾向が明らかである。

## (2) $p_c$ 近傍における下位・上位降伏点の存在

これまで、年代効果・土構造は有効土被り圧  $p_0$ 、圧密降伏応力  $p_c$  により比較検討されてきた<sup>1), 15), 16), 17)</sup>。ここでは、もう一つの降伏点として  $p_c$  近傍における対数圧縮指数  $C_c^*$  に関する降伏点の存在を検証する。

対数圧縮指数  $C_c^*$  の各関係において、概略同一  $I_p$  の各関係を図-11~13に示すように、圧密降伏応力  $p_c$  近傍の下位・上位圧密圧力で最小曲率点または折れ点として示される二つの降伏点、“下位降伏点”、“上位降伏点”が存在する。下位・上位降伏点は、図-9 (a), (b)に示す広範囲な  $I_p$  における関係においても明らかに存在する。ここで、下位・上位降伏点における対数圧縮指数を“下位降伏対数圧縮指数  $C_c^*_{lv}$ ”、“上位降伏対数圧縮指数  $C_c^*_{uv}$ ”と呼び、同様に圧密圧力を“下位降伏圧力  $p_{lv}$ ”、“上位降伏圧力  $p_{uv}$ ”と呼ぶ。

本章でその物理的意味について詳述するが、“対数圧縮指数比  $R_c$ ”を上位降伏対数圧縮指数  $C_c^*_{uv}$  の最終圧密圧力付近における収束対数圧縮指数  $C_c^*_{at final}$  に対する比 “ $R_c = C_c^*_{uv} / C_c^*_{at final}$ ” と定義することにより、沖積粘性土の基本的圧縮形態を  $R_c < 1.0$ ,  $R_c = 1.0$ ,  $R_c > 1.0$  に分類できる。下位・上位降伏点は、共に図-11~13に示すように、一般的に  $R_c < 1.0$  の場合は緩慢な曲線形状を示し最小曲率点として示され、また  $R_c \geq 1.0$  の場合は明確な折れ点として示される。

下位降伏点 ( $C_c^*_{lv}$ ) は、図-12, 13  $C_c^* \sim p_m$  ( $p_m/p_c$ ) 関係より圧密圧力が下位降伏圧力  $p_{lv}$  より大きくなれば、 $C_c^*$  が急激に大きくなる点で、圧密圧力に対する  $C_c^*$  の一次降伏点（一番目の降伏点）を意味する。なお、下位降伏点は、図-12に示すように、 $R_c < 1.0$  の場合、下位降伏圧力も小さくまた標準圧密試験の荷重ステップも粗いため、最小曲率点を求める上でやや精度に劣る。

上位降伏点 ( $C_c^*_{uv}$ ) は、図-11~13に示すように、圧密圧力が上位降伏圧力  $p_{uv}$  より大きくなれば、 $C_c^*$  の増減にかかわらず  $f$ （体積収縮）または  $\Delta C_c^* / \Delta f$  の減少が急増する点で、 $p, f$  に対する二次降伏点（二番目の降伏点）を意味する。下位降伏点は、圧密圧力に対するもので勾配  $\Delta C_c^* / \Delta p_m$  が急激に大きくなるが、 $C_c^* \sim f$  関係図において圧密圧力の増分に対する  $C_c^*$  の増分と  $f$  の減少分がほぼ等しく、下位降伏点は大きな変化点として現れない。このことは  $C_c^*$  が  $\log f \sim \log p$  関係において上位降伏点まで  $\Delta C_c^* / \Delta f$  がほぼ一定で滑らかに増大することを意味する。上位降伏点は、図-11に示すように、 $\Delta C_c^* / \Delta f =$ 一定線が形成される最大圧密圧力 ( $p_{uv}$ ) を示す上位の限界点で、 $p > p_{uv}$  で  $f$  が急激に減少する降伏点として示される。

以上、下位・上位降伏点は、圧密降伏応力  $p_c$  を挟んで粘性土の圧縮形態を支配する特異点として示される。

## (3) 下位・上位降伏点の物理的意味および圧密圧力の増大に伴う土構造と圧縮性の関係

下位降伏圧力  $p_{lv}$  と有効土被り圧  $p_0$  との関係図を図-15に示す。下位降伏圧力  $p_{lv}$  は、同図より、有効土被り圧  $p_0$  が大きくなれば  $p_{lv} < p_0$  の傾向も見られるが、平均的には  $p_0$  に等しいことが示される。 $C_c^*$  は、図-12に示すように、下位降伏点まで極めて小さく抑制されている。下位降伏点までの区間は、図-15に示す結果から、圧力が実質的にほぼ有効土被り圧  $p_0$  以下までであり、当区間が粘性土地盤の弾性領域と推定される。 $C_c^*$  が大きくなり始めるのは、圧密圧力が下位降伏圧力  $p_{lv}$  ( $\approx p_0$ ) より大きくなったときであるため、下位降伏点は粘土骨格・構造が弾性領域から塑性

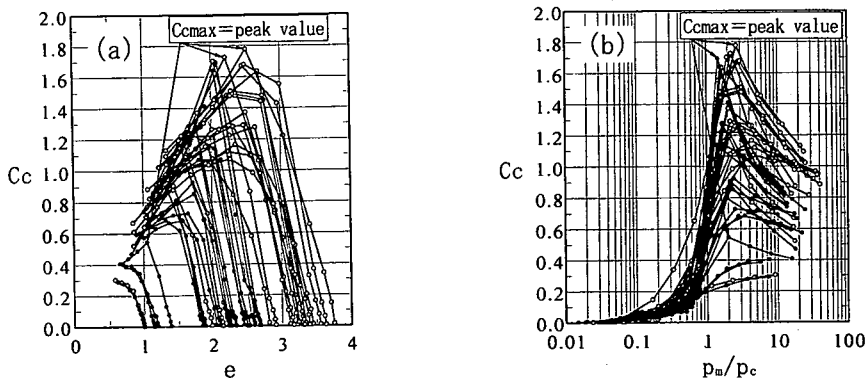


図-14 広範囲な  $I_p$  における  $C_c \sim f$ ,  $C_c \sim p_m/p_c$  関係 ( $e \sim \log p$  関係)

変形（破壊ではない）を伴い体積収縮し始める点として示される。

これまで  $\log f \sim \log p$  関係において膨潤圧縮曲線の範囲を決定する上で、曖昧な点があることは否めない。すなわち、膨潤対数圧縮指数  $Cc^*$  は、図-12、13 に示すように、圧密圧力が下位降伏点以下まで一定値を示さず、寧ろ緩やかに増加し、また  $Cc^*$  は、図-11 に示すように、体積比  $f$  に対して上位降伏点まで連続的に大きくなる傾向を示す。したがって、膨潤圧縮曲線の範囲は  $\log f \sim \log p$  関係において判断し難いのが実状である。膨潤圧縮曲線（弾性）の範囲はこれまで圧密降伏応力  $p_c$  以下までとされているが、その厳密な範囲は、以上述べた下位降伏点の粘土骨格・構造における物理的意味から判断すれば、粘土骨格・構造が塑性変形し初めていない下位降伏点までの範囲 ( $p < p_y$ ) と考えられる。

柳井および広島地点の諸パラメータ～標高（深度）関係をそれぞれ図-16、17 に示す。図中の  $Cc^*_{fc}$  は、図-13 に示

すように、圧密降伏応力  $p_c$ 、すなわち  $p_m/p_c=1.0$  における対数圧縮指数を示す。有効土被り圧  $p_0$ 、下位降伏圧力  $p_y$  は、図-16、17 より深度方向にはほぼ一致していることがわかる。下位降伏対数圧縮指数  $Cc^*_{ly}$  は、図-16、17 より、有効土被り圧の小さな表層を除き 0.022 と極めて小さく、深

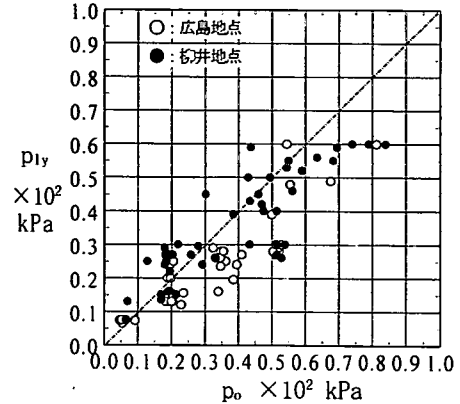


図-15  $p_0 \sim p_y$  関係図

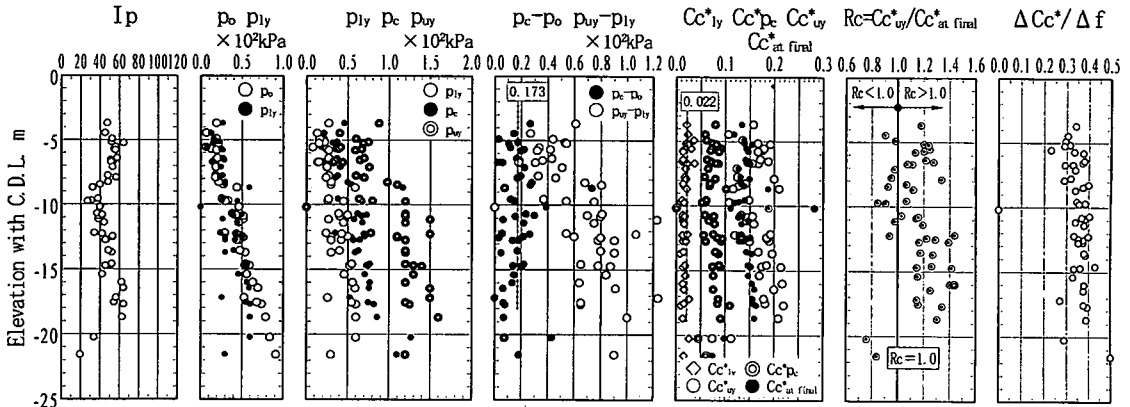


図-16 柳井地点における  $I_p$ 、 $p_0$ 、 $p_{1y}$ 、 $p_{1y}$ 、 $p_c$ 、 $p_{uy}$ 、 $(p_c - p_0)$ 、 $(p_{uy} - p_{1y})$ 、 $Cc^*_{ly}$ 、 $Cc^*_{pc}$ 、 $Cc^*_{uy}$ 、 $Cc^*_{at \text{ final}}$ 、 $R_c = Cc^*_{uy} / Cc^*_{at \text{ final}}$ 、 $\Delta Cc^* / \Delta f$  ～標高（深度）関係図

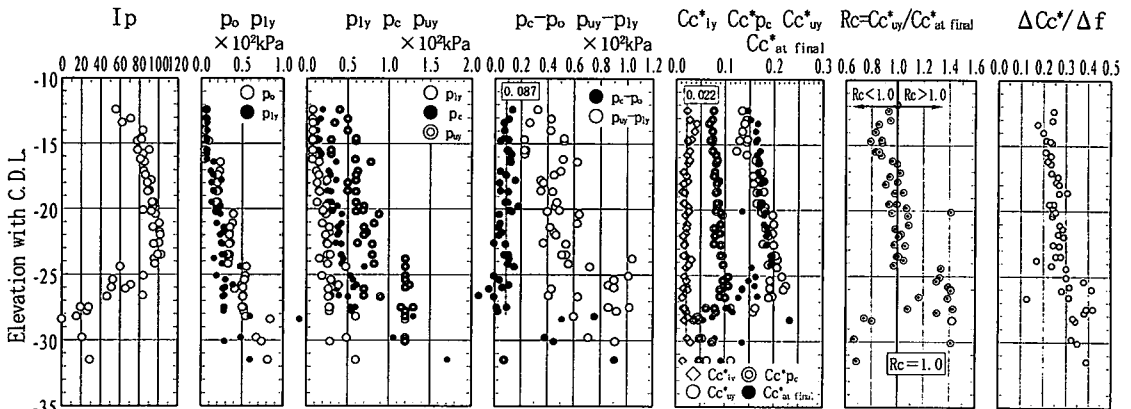


図-17 広島地点における  $I_p$ 、 $p_0$ 、 $p_{1y}$ 、 $p_{1y}$ 、 $p_c$ 、 $p_{uy}$ 、 $(p_c - p_0)$ 、 $(p_{uy} - p_{1y})$ 、 $Cc^*_{ly}$ 、 $Cc^*_{pc}$ 、 $Cc^*_{uy}$ 、 $Cc^*_{at \text{ final}}$ 、 $R_c = Cc^*_{uy} / Cc^*_{at \text{ final}}$ 、 $\Delta Cc^* / \Delta f$  ～標高（深度）関係図



度方向にはほぼ一定値を示している。厳密に調べると  $Cc^*_{ly}$  は、**図-21 (a)** に示すように、 $I_p$  によりやや増大する傾向が見られる。

**図-11** に示す  $Cc^* \sim f$  関係図において、上位降伏点まで  $Rc < 1.0$  の場合、勾配  $\Delta Cc^*/\Delta f =$ 一定線が概略形成され、特に  $Rc \geq 1.0$  になれば明確な勾配  $\Delta Cc^*/\Delta f =$ 一定線が形成されている。この一定線は  $f$  の減少と  $Cc^*$  の増分が等しいことを意味し、 $Rc > 1.0$  の場合  $Cc^*$  は上位降伏点で最大対数圧縮指数  $Cc^*_{wy}$  を示す。粘土骨格・構造は、上位降伏圧力  $p_{wy}$  より大きな圧力を受けると、破壊（または破壊の連鎖）を伴いながら  $f$  または  $\Delta Cc^*/\Delta f$  が急速に減少し始め、最終圧密圧力付近において  $Cc^*$  は収束する傾向を示す。**図-11** の  $Cc^* \sim f$  関係図において上位降伏点まで勾配  $\Delta Cc^*/\Delta f =$ 一定線が形成される事実は、粘土骨格の圧縮性が、圧密圧力の下位降伏圧力以上の増大により塑性変形しつつも、土構造により基本的に抑制されていることを意味する。したがって、上位降伏点  $Cc^*_{wy}$  は、土骨格が土構造による最大抵抗力を示し、土構造の破壊の開始点を表すと考える。

以上、土骨格・構造は、圧密圧力の増大に伴い、“弾性圧縮変形段階 ( $p < p_{ly}$ )”、“土構造の塑性変形を伴う緩やかな圧縮変形段階 ( $p_{ly} \leq p < p_{wy}$ )” および “土構造破壊後の急激な圧縮変形段階 ( $p_{wy} \leq p$ )” の各段階を経て圧縮変形しているものと推定される。以降、**図-19 (a)**、**図-23 (a)** に下位・上位降伏点を示しており圧縮曲線の各範囲を参照されたい。下位・上位降伏点は、それぞれ各圧縮変形段階の境界点を意味すると推定される。したがって、年代効果等による土骨格・構造の変形に及ぼす影響は、上位降伏点と下位降伏点の圧密圧力の差 ( $p_{wy} - p_{ly}$ ) に直接関係していると推定される。したがって、重要な点として年代効果・土構造の影響を調べる上で下位・上位降伏点に着目する必要がある。

ここで、上位降伏対数圧縮指数  $Cc^*_{wy}$  は、 $e \sim \log p$  関係において対比すれば、**図-9 (a)**、**(b)** と **図-14 (a)**、**(b)** の各関係に示すように  $I_p \geq 20 \sim 30$  において存在するピーク値  $Cc_{max}$  に概略等しい。すなわち、 $I_p \geq 20 \sim 30$  の範囲で  $e \sim \log p$  関係において存在する  $Cc_{max}$  は上位降伏対数圧縮指数  $Cc^*_{wy}$  にほぼ等しく、土構造の破壊点を意味する。

#### (4) 圧密降伏応力 $p_c$ の物理的意味 (下位・上位降伏点との比較)

これまで年代効果・土構造の圧縮特性に及ぼす影響は、 $e \sim \log p$  関係において圧密降伏応力  $p_c$  を求め、有効土被り圧  $p_o$  との差 ( $p_c - p_o$ )、応力比  $p/p_o$  により評価されてきた<sup>1),15),19),17)</sup>。圧密降伏応力  $p_c$  は、元来  $e \sim \log p$  関係における膨潤（弾性）領域と正規圧密（塑性）領域を便宜的に区分するものとし、Casagrande の方法<sup>18)</sup>により求められる。しかしながら、この方法によって求めた圧密降伏応力  $p_c$  は、あくまでも  $e \sim \log p$  関係における膨潤（弾性）領域と正規圧密（塑性）領域を二直線近似することを基本概念として

降伏点をやや強引に位置付けしたものであり、土骨格・構造と圧縮性との関わりから前節で述べた以上の厳密な物理的意味を持たないものとする<sup>19)</sup>。

ここで、 $e \sim \log p$  関係から求められる降伏点  $p_c$  が、 $\log f \sim \log p$  関係から求められる下位・上位降伏点と比較してどの程度になっているかを以下に比較検討した。柳井および広島地点における従来の評価手法である  $p_o$ ,  $p_c$ ,  $(p_c - p_o)$ ,  $Cc^*_{ly} \sim$  標高関係と下位・上位降伏点  $p_{ly}$ ,  $p_{wy}$ ,  $(p_{wy} - p_{ly})$ ,  $Cc^*_{ly} \cdot Cc^*_{wy} \cdot Cc^*_{at\,final}$ ,  $Rc = Cc^*_{wy}/Cc^*_{at\,final} \sim$  標高関係を**図-16**, **17** に同時に示す。

各降伏点の圧密圧力は、**図-16**, **17** より  $p_{ly} (= p_o) < p_c < p_{wy}$  であり、 $p_c$  は  $p_{ly}$  と  $p_{wy}$  との間で、かつ  $p_{ly}$  に近い値を示す。したがって、 $p_c$  は土骨格・構造が塑性変形し始める下位降伏圧力  $p_{ly}$  より大きく、かつ土骨格・構造が破壊し始める上位降伏圧力  $p_{wy}$  より小さく、かつ  $p_c$  は  $p_{ly}$  に近いことを考慮すると、土構造の破壊点ではなく、構造破壊前の塑性変形の開始点にほぼ近いことが示される。

$(p_c - p_o)$  は、両地点共に深度方向にほぼ一定であり、特に深度方向への増加傾向は認められない。しかしながら、年代効果・土構造の発現に直接関係すると考えられる  $(p_{wy} - p_{ly})$  は深度方向に増加の傾向が認められ、土構造は有効土被り圧  $p_o$  に大きな影響を受けていることが推定される。一方、 $Cc^*_{ly}$ ,  $Cc^*_{ly}$ ,  $Cc^*_{wy}$  の対比から、圧密降伏応力における  $Cc^*_{ly}$  は、 $Cc^*_{ly} < Cc^*_{ly} < Cc^*_{wy}$  であり、 $p_c$  の関係と同様に  $Cc^*_{ly}$  と  $Cc^*_{wy}$  との平均値よりやや小さな値を示す。

圧密降伏応力  $p_c$  はこれまで塑性域の開始点、すなわち“土構造を形成した土骨格の破壊点”として取扱われている。しかしながら、 $p_c$  は、前節で述べた土骨格・構造の圧縮変形の各段階において、塑性変形の段階に既に入っているが、構造の破壊の段階には到っていないものと判断する。土骨格・構造の破壊点は、実質的には上位降伏点と考えられる。

以上、従来降伏点として取扱われている圧密降伏応力  $p_c$  は、年代効果・土構造に間接的に影響を受けることが示されるが、その直接的な指標ではない。 $p_c$  は、土構造と変形の関係からはやや曖昧な指標となっている<sup>19)</sup>。

## 5. 基本的圧縮形態の分類と基準圧縮形態

### (1) 基本的圧縮形態の分類とその発現状況

$Cc^*$  は、**図-9** (広範囲な  $I_p$  の関係)、**図-11**~**13** (同一  $I_p$  の関係) に示すように初期体積比  $f_o < 2.0 \sim 2.2$  を除き  $p_m/p_e = 1.5 \sim 4.0$  付近で最小曲率点または折れ点として上位降伏対数圧縮指数  $Cc^*_{wy}$  を示し、その後圧密圧力  $p_m$  の増大に伴い最終圧密圧力付近で  $I_p$  に対応して  $Cc^*_{at\,final}$  にほぼ収束する傾向を示す。 $Cc^*_{at\,final}$  の収束状況は、**図-8**  $Cc^*_{9.4} \sim I_p$  関係、**図-11**~**13** (同一  $I_p$ ) を参照されたい。これら  $Cc^*$

の挙動から、沖積粘性土における基本的な圧縮形態は、 $Cc^*_{at\ final}$  (=収束値) を基準に分類できる。すなわち、先述したように土構造の破壊に直接関係する上位降伏点  $Cc^*_{wy}$  とほぼ収束する  $Cc^*_{at\ final}$  より “対数圧縮指数比  $Rc = Cc^*_{wy}/Cc^*_{at\ final}$ ” と定義すると、沖積粘性土の基本的な圧縮形態は次の3種類に分類できる。

(I)  $Rc < 1.0$  :  $Cc^*$  が圧密圧力  $p$  の増大に伴い最小曲率点  $Cc^*_{wy}$  を示し、その後徐々に大きくなり  $Cc^*_{at\ final}$  付近に収束する。当圧縮形態は、有効土被り圧  $p_0$  が  $Rc=1.0$  の圧縮形態より浅い地盤(表層付近)に現れる。

(II)  $Rc = 1.0$  :  $Cc^*$  が  $p$  の増大に伴い折れ点または最小曲率点で  $Cc^*_{wy}$  を示し、その後一定値のまま  $Cc^*_{at\ final}$  付近に収束する。当圧縮形態の特徴は、塑性域が収束する  $Cc^*_{at\ final}$  に等しく直線を示す。

(III)  $Rc > 1.0$  :  $Cc^*$  が  $p$  の増大に伴い折れ点でピーク値  $Cc^*_{wy}$  を示し、その後低下して  $Cc^*_{at\ final}$  付近に収束する。当圧縮形態は、有効土被り圧  $p_0$  が  $Rc=1.0$  の圧縮形態より深い地盤において現れ、有効土被り圧と共に  $Rc$  も大きくなる傾向を示す。

一般に海面下に堆積する沖積粘性土は有効土被り圧  $p_0$  が小さく、特に高塑性粘性土においては  $Rc < 1.0$  の圧縮形態が出現する。このように沖積粘性土では、浮遊土粒子の沈降・沈殿→自重圧密→堆積と地表面からの深度に従い、堆積による圧縮形態の発展過程が現れていると考えられる。従来の  $e \sim \log p$  関係の整理で、表層付近において膨潤圧縮曲線と正規圧密曲線がやや明確でない乱れたような  $e \sim \log p$  関係が現れており、当地層が  $Rc < 1.0$  の圧縮形態を示す地盤であり、特に  $I_p$  が 100 程度の高塑性粘性土では 7~10m と深部まで及んでいる。

ただし、 $e \sim \log p$  関係の整理では収束する  $Cc^*_{at\ final}$  が現れず、 $\log f \sim \log p$  関係での  $Rc < 1.0$  の圧縮形態は、 $e \sim \log p$  関係では見掛け上  $Rc > 1.0$  に示す圧縮形態となる(図-9(a), (b), 図-14(a), (b)参照)。

図-18(a), (b), (c)に  $Rc \sim I_p$ ,  $p_0 \sim I_p$ ,  $\rho_c \sim I_p$  関係をそれぞれ示した。ここで、粘性土の基本的な圧縮形態  $Rc$  に及ぼす  $I_p$  と有効土被り圧  $p_0$  の影響を調べた。すなわち、図-18(b)の  $p_0 \sim I_p$  関係図で ( $p_0$ ,  $I_p$ ) がほぼ同値を示すグループに分類し、各グループの平均値を求め、図中に◎で示した。図-18(a)の  $Rc \sim I_p$  関係図で  $p_0$  の概略等しい点をコンターで示し、次に同様に図-18(b)の  $p_0 \sim I_p$  関係図で図-18(a)の  $Rc \sim I_p$  関係図を参照して結んだ  $Rc$  のコンターを示した。図-18(a), (b)の各関係図におけるコンターは、グループ内のデータ数も異なり、グループ数も十分ではなく、ばらつきも大きくなっているが、概略平均的コンターを示す。

沖積粘性土の圧縮形態は、図-18(a)の  $Rc \sim I_p$  関係に示すように、同じ  $I_p$  であれば  $p_0$  が大きくなるに従い  $Rc < 1.0 \rightarrow Rc = 1.0 \rightarrow Rc > 1.0$  の圧縮形態を示す。また、これら

粘性土の圧縮形態は、 $I_p$  の程度により大きく影響を受けることが同図から明らかであり、 $I_p$  が 50 より小さくなれば同じ  $p_0$  でも  $Rc$  は低下する傾向を示し、 $I_p < 20 \sim 30$  において砂分の影響が大きくなり  $Rc < 1.0$  の圧縮形態が多く現れる。一方、 $I_p > 80$  において  $I_p$  が大きくなれば、データ数は十分とは言えないが、同一の  $p_0$  において  $Rc$  は緩やかに低下する傾向を示す。地盤内の圧縮形態は、図-18(a)に示すように変化に富む圧縮形態を示す。当コンターは2地点の沖積粘性土のデータで作成したものであり、粘性土の物性によってコンターは変わることが想定されるが、沖積粘性土の圧縮特性の基本的傾向を示すものとする。

## (2) 基準圧縮形態 $Rc=1.0$ と限界有効土被り圧 $p_{oc}$

特に圧縮形態の内  $Rc=1.0$  の圧縮形態は、図-11(図-9参照)の  $Cc^* \sim f$  関係において、上位降伏圧力  $p_{wy}$  を境に圧密圧力が  $p_{wy}$  より小さい場合  $\Delta Cc^*/\Delta f = \text{一定}$  の直線、圧密圧力が  $p_{wy}$  より大きい場合  $Cc^* = Cc^*_{wy} = Cc^*_{at\ final}$  一定の二直線からなる圧縮形態を示す。当圧縮形態は、図-18(b)  $p_0 \sim I_p$  関係の  $Rc=1.0$  のコンターに示すように、ある深度(有効土被り圧  $p_0$ )において現れ、この深度より浅い深度における圧縮形態  $Rc < 1.0$  と深い深度における  $Rc > 1.0$  とを区分し、年代効果の発現において基準となる圧縮形態を示すため、以降“基準圧縮形態”と呼ぶ。また、図-18(b)に示すように基準圧縮形態を示す有効土被り圧を“限界有効土被り圧、 $p_{oc}$ ”と呼ぶことにする。限界有効土被り圧  $p_{oc}$  は

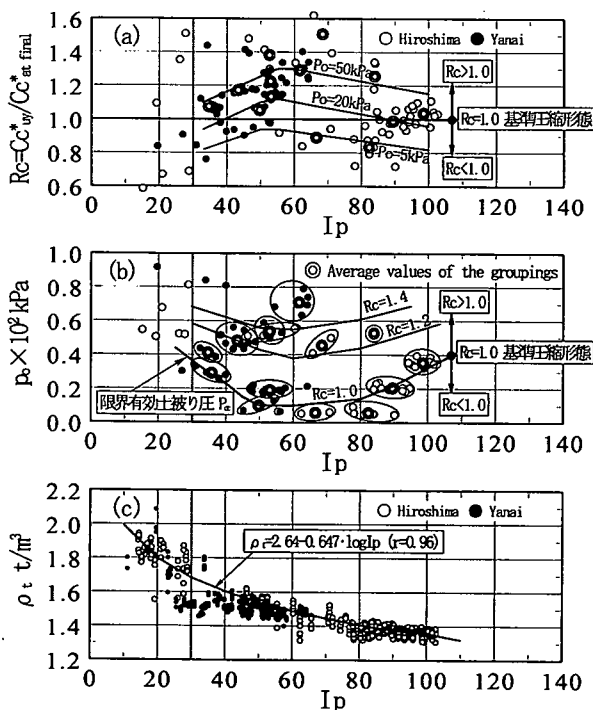


図-18  $Rc \sim I_p$ ,  $p_0 \sim I_p$ ,  $\rho_c \sim I_p$  関係 (圧縮形態への  $p_0, I_p$  の影響)

$I_p$  が 40 より小さくなると大きくなり、 $I_p$  が 80 より大きくなると  $p_{oc}$  も大きくなる傾向を示し、 $I_p$  が約 50~80 で最小値を示す。限界有効土被り圧  $p_{oc}$  を示す深度は、**図-18 (b)** より  $I_p=40\sim 80$  程度の地盤では地表面または深度 2m 程度の深さで現れ、 $I_p=100$  程度の高塑性性の地盤においては深度 7~10m 程度とやや深部にまで現れる。

広範囲な  $I_p$  における基準圧縮形態  $R_c=1.0$  として  $\log f \sim \log p$ ,  $Cc^* \sim f$ ,  $Cc^* \sim p_m (p_m/p_c)$  関係図を**図-19 (a)~(d)** に示した。**図-19 (a)** に有効土被り圧  $p_o$ 、圧密降伏応力  $p_c$ 、下位降伏点  $p_{ly}$ 、上位降伏点  $p_{uy}$  を示した。基準圧縮形態は、**図-19 (b)** において、 $I_p$  が異なった場合はほぼ相似形状を示している。ここで、**図-19 (b)** における形状を調べると、 $p \geq p_{uy}$  の範囲では、概略収束値と考えられる  $Cc^*_{9.4}$  ( $=Cc^*_{at\ final}=Cc^*_{uy}$ ) は**図-8** に示すように  $I_p$  と高い相関性を示す。また、**図-20 (a)** に  $Cc^* \sim f$  関係で  $p < p_{uy}$  の範囲で  $R_c < 1.0$ ,  $R_c = 1.0$ ,  $R_c > 1.0$  の全て  $R_c$  について最大の  $\Delta Cc^*/\Delta f$  を  $I_p$  に対してプロットし、また  $R_c = 1.0$  の場合の回帰直線を示した。 $R_c = 1.0$  の場合の  $\Delta Cc^*/\Delta f$  は 0.25~0.37 程度であり、 $I_p$  と高い相関性を示し、 $I_p$  が小さくなるほど大きくなっている。したがって、基準圧縮形態は  $I_p$  により大きく変化し、かつ概略形状が規定されていることがわかる。

ここで、**図-20 (a)** には、**図-20 (b)** の概略 ( $p_o, I_p$ ) の等しいグループの平均値を◎で参考に示した。**図-11** に示すように  $R_c \geq 1.0$  で明確な  $\Delta Cc^*/\Delta f = \text{一定}$  の直線が形成されるが、このとき  $p < p_{uy}$  において  $\Delta Cc^*/\Delta f$  の値は**図-20 (a), (b)** より基本的には有効土被り圧  $p_o$  による変化は小さいことがわかる。

基準圧縮形態は、 $\log f \sim \log p$  関係において膨潤圧縮曲線と正規圧密曲線を二直線で近似するとき、**図-19 (a)** に示すように最も理想的な形として示される。 $I_p$  が同じ粘土であれば、基準圧縮形態は**図-18 (a), (b)** に示すようにある深度でしか現れず、地盤中の深度で粘性土の圧縮形態は連続的に変化することが推定される。基準圧縮形態の意味は、**図-18 (a)** に示すように年代効果・土構造による圧縮形態の変化を追跡する基準になる。

## 6. 年代効果・土構造の発現と圧縮形態

上位降伏点  $Cc^*_{uy}$  は、**図-18 (a)** に示すように、有効土被り圧  $p_o$  や  $I_p$  により収束値である  $Cc^*_{at\ final}$  (基準圧縮形態  $R_c=1.0$  の  $C_{uy}$ ) と大きく異なっており、 $\log f \sim \log p$  関係は  $I_p$  や  $p_o$  により変化に富む圧縮形態を示す。

### (1) 年代効果・土構造による $Cc^*_{uy}$ への影響

$Cc^*_{ly}$ ,  $Cc^*_{at\ final}$ ,  $Cc^*_{uy} \sim I_p$ ,  $Cc^*_{4.7}/Cc^*_{9.4} \sim I_p$ ,  $f_{125}$ ,  $f_{ly}$ ,  $f_o \sim I_p$  関係図を**図-21 (a)~(c)** に示す。ここで、 $f_{125}$  は最終圧密圧力付近の  $p=1,254\text{kPa}$  における体積比、 $f_{ly}$  は上位降伏点における体積比を示す。ここで、**図-21 (a)~(c)** でデータ数が異なっている。これは、 $Cc^*_{at\ final} (=Cc^*_{9.4})$  は、圧密圧力  $p=1,254\text{kPa}$  まで載荷した圧密試験を対象にしたため、圧密圧力  $p=627\text{kPa}$  まで圧密試験した数より少なくなったことによる。また、**図-21 (c)** において  $I_p < 30$  のデータがないのは、基本的圧縮形態別 ( $R_c < 1.0$ ,  $R_c = 1.0$ ,  $R_c > 1.0$ ) にデータを整理し、 $I_p$  に対する回帰直線を求めたとき、 $I_p < 30$  は基本的に回帰直線の対象外としてデータ整理において省略したことによる。**図-21 (a)** において**図-18 (b)**  $p_o \sim I_p$  関係における同じ ( $p_o, I_p$ ) グループの平均値を◎で示す。**図-21 (a)**  $Cc^*_{uy}$ ,  $Cc^*_{at\ final} \sim I_p$  関係に示すように、上位

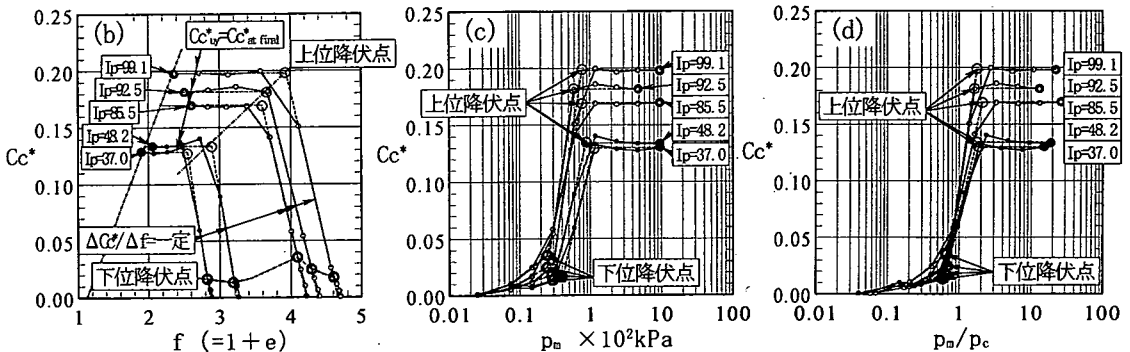


図19 広範囲な塑性指数域における基準圧縮形態 ( $\log f \sim \log p$ ,  $Cc^* \sim f$ ,  $Cc^* \sim p_m$ ,  $Cc^* \sim p_m/p_c$  関係図)

降伏点の  $Cc^*_{vy}$  の変化は、図-18 (a)  $Rc \sim I_p$  関係と同様に、 $p_0$  をコンターとして概略説明することができる。図-21 (b) の  $Cc^*_{4.7}/Cc^*_{9.4}$  は、最終圧密圧力において 0.96~1.13 と概略 1.0 を示し、図-8 同様に  $Cc^*_{at final}$  がほぼ収束している状況が確認できる。ここで、図-21 (a) の  $Cc^*_{vy} \sim I_p$  関係図より  $p_0=5 \text{ kPa}$  で  $Rc < 1.0$  の圧縮形態が出現しており、沖積粘性土の表層において、特に高塑性の場合はやや厚く堆積している。以上、年代効果・土構造の発現は、上位降伏点の  $Cc^*_{vy}$  に大きな影響を及ぼしており、 $Cc^*_{vy}$  への影響は収束  $Cc^*_{at final}$  に対して対数圧縮指数比  $Rc$  を介し概略説明できる。したがって、 $Cc^*_{vy}$  (上位降伏点) の収束  $Cc^*_{at final}$  に対する変化そのものが、4. で述べたように土構造の破壊と直接関係しており、年代効果・土構造の発現によるものである。

比較のために、 $e \sim \log p$  関係における  $Cc_{max}$ ,  $Cc_{9.4}$  ( $=Cc^*_{at final}$ ),  $Cc_{4.7}/Cc_{9.4} \sim I_p$  関係を図-22 (a), (b) に示した。 $Cc_{max}$  は  $Cc^*_{vy}$  と同様に上位降伏点を意味するが、 $Cc$  が図-22 (b) の  $Cc_{4.7}/Cc_{9.4}$  に示すように  $I_p$  に大きく影響され、最終圧密圧力で  $Cc_{4.7}/Cc_{9.4} > 1.0$  と収束することがなく、年代効果そのものの影響以外に  $I_p$  の影響が大きくなったことによる (図-5 参照)。このため、 $Cc_{max}$  は、図-22 (a) に示すように、高塑性指数域を含む全ての  $I_p$  について  $Cc_{9.4}$  ( $=Cc^*_{at final}$ ) より大きくなる。したがって、 $e \sim \log p$  関係においては、高塑性粘性土の塑性域の非直線性が大きくなる他、 $Cc_{max} > Cc_{9.4}$  ( $=Cc^*_{at final}$ ) の事実も、見掛け上年代効果が進む現象として理解される結果となる。しかしながら、 $e \sim \log p$  関係においては圧縮形態に年代効果の影響以外に  $I_p$  の影響を大きく受けており、年代効果の発現を正確に把握することができない。

## (2) 年代効果・土構造の発現と圧縮形態の変化

$I_p=78 \sim 85$  とほぼ同一で有効土被り圧  $p_0$  が異なった場合の  $\log f \sim \log p$ ,  $Cc^* \sim f$ ,  $Cc^* \sim p_m$ ,  $Cc^* \sim p_m/p_0$ ,

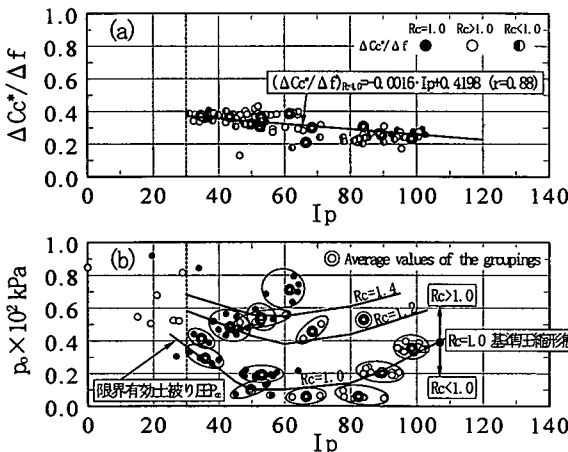


図-20  $\Delta Cc^*/\Delta f \cdot p_0 \sim I_p$  関係

$\Delta Cc^*/\Delta f \sim f$  関係を図-23 (a)~(e) に示した。当関係は  $I_p$  が同じ自然堆積地盤において、 $p_0$  の増加により圧縮形態が連続的に変化している状況を示す。これまで構造のない粘性土の圧縮曲線として再構成粘性土が用いられている。 $p_0$  により圧縮形態が未成熟な粘土構造の形態 (当土構造の場合、上位降伏点  $p_{vy}$  の飛び出しと逆なへこみの現象が出現) から連続的に変形する自然堆積地盤において再構成粘性土を基準に年代効果を評価することの意味に不明な点があることや、ここでは特に自然堆積地盤の土構造形成過程を評価することに重点を置いたために、再構成粘性土を基準に評価する方法は採用していない。

図-18 (a), (b) に示す結果から広範囲な塑性指数域において有効土被り圧  $p_0$  の増大に伴い、堆積年代が一般に古くなり、年代効果の発現が大きくなることが推定される。特に、年代効果・土構造の発現は、基本的圧縮形態  $Rc < 1.0$  (浅い地盤,  $Rc \geq 1.0$  (深い地盤)) により大きく異なる傾向が認められるため、基本的圧縮形態と年代効果・土構造の発現に関して以降に調べた。

## a) 圧縮形態 $Rc < 1.0$ の年代効果・土構造の発現

浅い地盤での  $Rc < 1.0$  の圧縮形態は、図-23 (b)  $Cc^* \sim f$  関係に示すように、 $p < p_{vy}$  の範囲で  $\Delta Cc^*/\Delta f =$ 一定線が概略形成され、図-23 (a)  $\log f \sim \log p$  関係において弾性域・塑性域が  $Rc \geq 1.0$  の場合と比べて明瞭でない。 $Rc < 1.0$  の初期体積比  $f_0$  は、図-23 (b) に示すように  $Rc \geq 1.0$  の場合に比べてやや大きくなり、弾性域の勾配が緩くなる傾向が

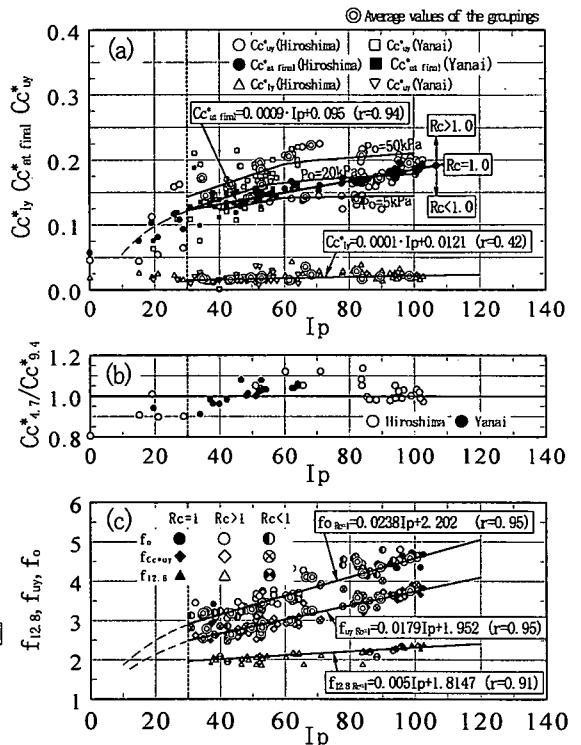


図-21  $Cc^*_{vy} \cdot Cc^*_{at final} \cdot Cc^*_{vy} \sim I_p$ ,  $Cc^*_{4.7}/Cc^*_{9.4} \sim I_p$ ,  $f_{12.8} \cdot f_{vy} \cdot f_0 \sim I_p$  関係

認められる。当圧縮形態における強度特性は、図2(b)に示すように破壊ひずみが大きく、かつ軸圧縮強度も小さくなっており、土構造が未成熟な地盤が形成されている。当圧縮形態において $Cc^*$ は上位降伏対数圧縮指数 $Cc_{uv}^*$ を示した後、圧密圧力の増加に伴い土構造を破壊しながら $Cc^*$ が大きくなる“圧縮性の硬化現象”を示す。当圧縮形態は、土構造が緩く自然堆積地盤自体があたかもやや乱れを受けたような圧縮形態と強度特性を示す。

$Rc < 1.0$ の圧縮形態の地盤は、図18(b)  $p_0 \sim I_p$  関係に示すように限界有効土被り圧  $p_{oc}$  を境に  $p_0 < p_{oc}$  で形成される。Bjerrum が指摘するように遅延圧密が堆積年代とともに無限に進行すると仮定すれば、年月の経過に従い  $Rc > 1.0$  の地盤が形成されることが推定される。 $Rc < 1.0$ の圧縮形態は、 $p_0 < p_{oc}$  であるために遅延圧密が停止しているか、または Bjerrum が指摘するように遅延圧密が現時点において進行中で  $Rc > 1.0$  の圧縮形態に移行する過程にあることが推定される。

$(p_{uv} - p_{lv}) \sim I_p$ ,  $(p_c - p_0) \sim I_p$ ,  $p_0 \sim I_p$  関係を図24(a) ~ (c)に示した。図24(a), (b)において、図24(c)の同一( $p_0$ ,  $I_p$ )グループから求めた $(p_{uv} - p_{lv})$ ,  $(p_c - p_0)$ の平均値(◎)を示した。また、図24(a)に平均値から概略求められる対数圧縮指数比  $Rc$  のコンターを、図24(b)に $(p_c - p_0)$ は  $p_0$  による大きな変動がなくここではその平均値を示した。 $Rc = 1.0$ のコンターで示す $(p_{uv} - p_{lv})_{Rc=1.0}$ 値は、図24(a)に示すように、 $I_p$ の相違により大きく異なる傾向を示す。下位降伏点が  $p_{lv} \approx p_0$ であることを考慮すると、 $(p_{uv} -$

$p_{lv})_{Rc=1.0}$ 値は、土構造の破壊点( $p_{uv}$ )に到るまでの  $p_0$ 以上の値であり、図24(c)の限界有効土被り圧  $p_{oc}$  ( $Rc = 1.0$ の  $p_0$ )と比較しても20 kPa程度大きな値を示し、 $(p_{uv} - p_{lv})_{Rc=1.0}$ と  $p_{oc}$ は  $I_p$ に対して類似した形状を示す。 $Rc = 1.0$ の圧縮形態は、図23(a)~(d)より  $Rc < 1.0$ の乱れたような圧縮形態と比較して  $\Delta Cc^*/\Delta f$ 一定線を形成し始めており、土構造が安定化し始めたものと判断できる。 $(p_{uv} - p_{lv})$ は、構造が塑性化し破壊するまでの降伏圧力差を示し、構造に関するセメンテーション効果を示すと考えられる。

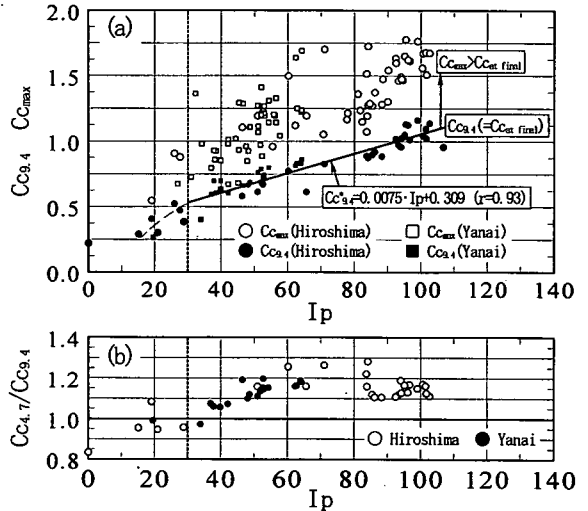


図22  $Cc_{0.4} \cdot Cc_{max}$ ,  $Cc_{0.7}/Cc_{0.4} \sim I_p$  関係図 ( $e \sim \log p$  関係)

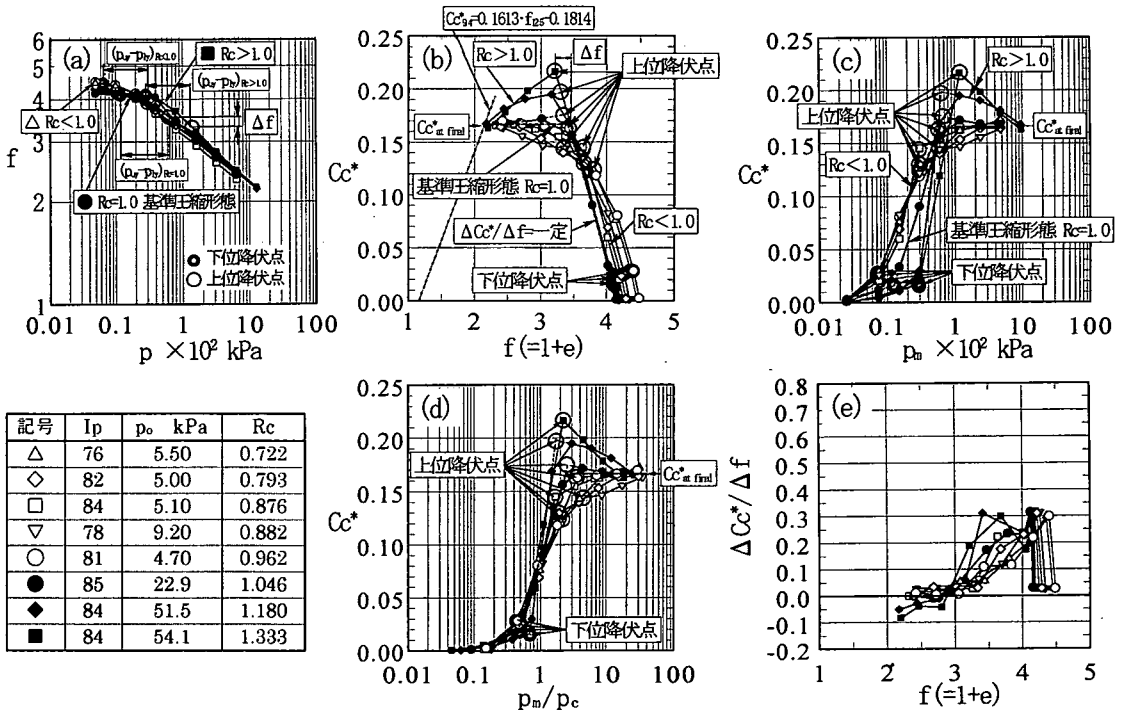


図23 同一  $I_p$  における  $\log f \sim \log p$ ,  $Cc^* \sim f$ ,  $Cc^* \sim p_m$ ,  $Cc^* \sim p_m/p_c$  関係図

記号	$I_p$	$p_0$ kPa	$Rc$
$\Delta$	76	5.50	0.722
$\diamond$	82	5.00	0.793
$\square$	84	5.10	0.876
$\nabla$	78	9.20	0.882
$\circ$	81	4.70	0.962
$\bullet$	85	22.9	1.046
$\blacklozenge$	84	51.5	1.180
$\blacksquare$	84	54.1	1.333

したがって、 $Rc=1.0$ の $(p_{wy}-p_b)_{Rc=1.0}$ 値は、土構造が安定化し始めたときの“土粒子そのものが持つセメンテーション効果”を示すものとする。  $Rc < 1.0$ の圧縮形態は、図-23 (a)に示すように  $\log f \sim \log p$  関係の塑性域において上に凸の圧縮曲線を示すが、 $(p_{wy}-p_b)_{Rc < 1.0}$ が $(p_{wy}-p_b)_{Rc=1.0}$ 以下のある値を示すことから  $Rc < 1.0$ の上に凸な圧縮形態においても緩い構造に関するセメンテーション効果を有していることが推定される。高塑性粘性土においては自重が小さくなること(図-18 (c)  $p_t \sim I_p$  関係参照)、自然堆積地盤の限界有効土被り圧  $p_{oc}$  も大きくなっていることから、遅延圧密が無限に進行する段階に到らず、自然堆積地盤自体が年代効果・土構造の未成熟な地盤を形成していると推定される。すなわち、長年月経過しても有効土被り圧  $p_o$  の増加がない限り、遅延圧密が進行しない自然堆積地盤が形成されている。

当圧縮形態は、高塑性粘性土地盤の表層にやや厚く出現し、遅延圧密が無限に進行するとして Bjerrum の提案モデルでは説明できない地盤が形成されている。

### b) 圧縮形態 $Rc \geq 1.0$ の年代効果・土構造の発現

有効土被り圧が限界有効土被り圧  $p_{oc}$  より大きくなり、図-1 b)に示すように、対数圧縮指数比  $Rc$  が 1.0 より大きくなれば、一軸圧縮試験における破壊ひずみが小さく、かつ図-16, 17に示すように土構造に係わる $(p_{wy}-p_b)$ が大きくなる傾向が認められる。 $Rc \geq 1.0$  (深い地盤)においては年代効果・土構造が顕著となり、その程度は  $Rc$  により異なることが推定される。当圧縮形態において  $Cc^*$  は、図-23 (b) ~ (d) の関係に示すように上位降伏点でピーク値  $Cc^*_{wy}$  を示した後、圧密圧力の増加に伴い土構造を破壊しながら  $Cc^*$  が小さくなる“圧縮性の軟化現象”を示す。

地盤内のある要素について有効土被り圧  $p_o$  が限界有効土被り圧  $p_{oc}$  に等しくなり、基準圧縮形態  $Rc=1.0$  が出現し、図-23 (b)  $Cc^* \sim f$  関係に示すように  $p < p_{wy}$  の範囲で明確な  $\Delta Cc^*/\Delta f = \text{一定線}$  が形成される。さらに、有効土被り圧  $p_o > \text{限界有効土被り圧 } p_{oc}$  になれば、図-18 (a), (b)  $p_o \sim I_p$ ,  $Rc \sim I_p$  関係より  $Rc > 1.0$  の地盤が形成されている。図-20 (a)  $\Delta Cc^*/\Delta f \sim I_p$  関係に示すように  $I_p$  が同じであればほぼ同じ  $\Delta Cc^*/\Delta f = \text{一定線}$  の形成を示しており、図-23 (b)  $Cc^* \sim f$  関係ではほぼ同一の  $\Delta Cc^*/\Delta f = \text{一定線}$  上、または遅延圧密により体積減少した体積比平行移動した  $\Delta Cc^*/\Delta f = \text{一定線}$  上で年代効果が進行することが推定される。すなわち、上位降伏点の  $Cc^*_{wy}$  は、有効土被り圧  $p_o > \text{限界有効土被り圧 } p_{oc}$  であるために、 $\Delta Cc^*/\Delta f = \text{一定線}$  上で遅延圧密により土構造が発達し、 $Cc^*_{wy} = Rc \times Cc^*_{at \text{ final}}$  ( $Cc^*_{at \text{ final}} = \text{収束値}$ ) と  $Cc^*_{at \text{ final}}$  (基準圧縮形態) より大きくなり、圧縮形態が基準圧縮形態から変化するものと推定される。このとき、 $Rc > 1.0$  の上位降伏点の体積比  $(f_{wy})_{Rc > 1.0}$  は、図-23 (b) に示すように概略  $\Delta Cc^*/\Delta f = \text{一定線}$  上で遅延圧密により基準圧縮形態  $Rc=1.0$  の上位降伏点の体積比  $(f_{wy})_{Rc=1.0}$  から  $\Delta f$

減少する。すなわち、図-23 (a), (b) に示すように上位降伏点における  $f$  の減少分  $\Delta f = (f_{wy})_{Rc=1.0} - (f_{wy})_{Rc > 1.0}$  は、図-24 (a) に示すように  $(p_{wy}-p_b)_{Rc > 1.0}$  が  $(p_{wy}-p_b)_{Rc=1.0}$  より大きくなっており圧縮過程で土構造の強さが強化された結果と判断できる。このことは  $Rc > 1.0$  の地盤において遅延圧密の進行に伴いセメンテーションにより土構造を強化し、圧縮形態が変化することを意味する。年代効果・土構造の発現は、圧縮形態の変化となって現れ、逆に圧縮形態の変化から土構造・年代効果の発現の程度を把握できることを意味する。

以上、セメンテーション効果の発現は、図-24 (a) に示すように、 $Rc < 1.0$  ではセメンテーション効果のみの緩い土構造を有し、 $Rc \geq 1.0$  では遅延圧密によりセメンテーション効果が強化された土構造を有し、 $Rc < 1.0$  と  $Rc > 1.0$  の圧縮形態ではセメンテーション効果が異なって現れていると推定される。年代効果・土構造の発現と圧縮形態の変化および強度特性についてまとめた結果を表1に示した。

### (3) 年代効果の定量的評価方法

これまで精査してきたように、自然堆積地盤において年代効果の発現やこれに伴う圧縮形態の変化は、基準圧縮形態を基準に定量的に評価できる。

$Rc < 1.0$  においては堆積年代も若く、土構造が未成熟で、やや乱れたような圧縮・強度特性を示す。土構造の未成熟

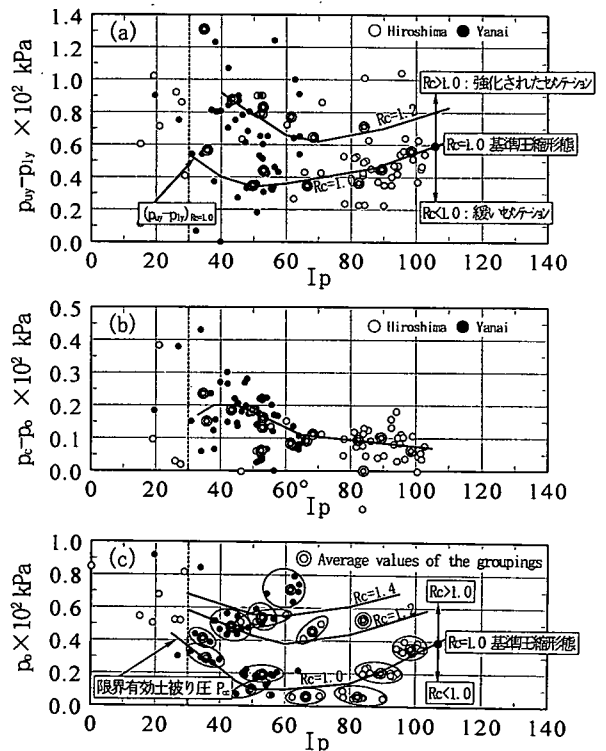


図-24  $p_{wy}-p_b \sim I_p$ ,  $p_w-p_o \sim I_p$ ,  $p_o \sim I_p$  関係

な程度は  $Rc = Cc^*_{uv} / Cc^*_{at\ final} < 1.0$  により評価できる。すなわち、

$$\text{対数圧縮指数比} : Rc = Cc^*_{uv} / Cc^*_{at\ final} < 1.0$$

一方、 $Rc > 1.0$  において土構造の発現の程度は、 $Rc$  と  $\Delta f$  により定量的に評価できる。すなわち、

$$\text{対数圧縮指数比} : Rc = Cc^*_{uv} / Cc^*_{at\ final} > 1.0$$

$Rc > 1.0$  の上位降伏点の体積比  $(f_{uv})_{Rc > 1.0}$  の  $Rc = 1.0$  の上位降伏点の体積比  $(f_{uv})_{Rc = 1.0}$  から減少  $\Delta f$  :

$$\begin{aligned} \Delta f &= (f_{uv})_{Rc = 1.0} - (f_{uv})_{Rc > 1.0} \\ &= \Delta Cc^* / A = Cc^*_{at\ final} \times (Rc - 1.0) / A \end{aligned}$$

ここで、 $\Delta Cc^* / \Delta f = A$  (図-20 (a)参照,  $I_p$  により変化)。  $\Delta f$  は、粘土骨格・構造の強さに関係する。

#### (4) 年代効果の総量 $(p_{uv} - p_{lv})$ と $(p_c - p_o)$ との比較

年代効果は、これまで  $(p_c - p_o)$  により評価されてきた。しかしながら、年代効果・土構造の総量は、4.より実質的に  $(p_{uv} - p_{lv})$  により直接評価できると考える。 $(p_{uv} - p_{lv})$ 、 $(p_c - p_o)$  の  $I_p$  による関係を図-24(a), (b)に示す。

$(p_{uv} - p_{lv})$  と  $(p_c - p_o)$  は、図-24 (a), (b)に示すように、大きく異なり、また共に  $I_p$  により大きな影響を受けている。 $(p_{uv} - p_{lv})$  は、 $Rc$  すなわち有効土被り圧  $p_o$  に影響を受けているが、 $(p_c - p_o)$  は  $p_o$  による変化が極めて少なく、 $I_p$  によりほぼ一定値を示す。

年代効果の発現は、先述したように圧縮形態  $Rc < 1.0$  (浅い地盤) と  $Rc > 1.0$  (深い地盤) により異なっている。ここで、図-24 (a)で基準圧縮形態  $Rc = 1.0$  のコンターを示しており、当コンター以下の  $(p_{uv} - p_{lv})$  は概略  $Rc < 1.0$  の圧縮形態を示し、遅延圧密の進行の段階に到らず、緩いセメンテーションを示すと推定される。 $Rc = 1.0$  のコンターは、 $I_p$  が大きくなれば緩やかに大きくなっており、高塑性粘性土になれば  $(p_{uv} - p_{lv})$  が大きくなる。 $Rc < 1.0$  の  $(p_{uv} - p_{lv})$  は、破壊ひずみが大きく、土構造の強度増加への寄与が小さく、

土構造の形成が未成熟と推定される。一方、 $(p_{uv} - p_{lv})$  が  $Rc = 1.0$  のコンターより大きくなると、 $Rc > 1.0$  の圧縮形態を示すために、遅延圧密が進行する段階に到り、強化されたセメンテーションを有すると考える。 $Rc > 1.0$  の  $(p_{uv} - p_{lv})$  は、破壊ひずみが小さく、土構造の強度増加への寄与が大きく、年代効果・土構造の発現が大きくなる。

柳井地点の低・中塑性粘性土は、図-24 (a)に示すように  $(p_{uv} - p_{lv})$  が  $Rc > 1.0$  のコンター内にあり、年代効果・土構造の発現が大きく、一方広島地点の粘性土は  $(p_{uv} - p_{lv})$  が  $Rc = 1.0$  または  $Rc < 1.0$  のコンター内にあり、年代効果・土構造の発現が小さい。年代効果・土構造は、実質的に  $(p_{uv} - p_{lv})$  で表され、内容は、図-24 (a)に示すように  $Rc = 1.0$  のコンターを基準に  $Rc < 1.0$  と  $Rc > 1.0$  で異なっている。

一方、 $(p_c - p_o)$  は、図-24 (b)に示すように、 $p_o$  により大きな変化を示さず、 $I_p$  により大きな相違、すなわち  $(p_c - p_o)$  が低・中塑性粘性土で大きく、高塑性粘性土で小さくなる傾向を示す。この関係は、図-16, 17  $(p_c - p_o) \cdot (p_{uv} - p_{lv}) \sim$  標高(深度)関係において、 $(p_c - p_o)$  が  $I_p$  による変動を示しても、ほぼ深度方向に一定値を示す結果と一致する。 $(p_c - p_o)$  は土構造に係わる上位降伏点の影響を明確に示さず、 $(p_{uv} - p_{lv})$  の場合と異なった傾向を示す。圧密降伏応力  $p_c$  は、元来  $e \sim \log p$  関係で4.に示す上位降伏点のように年代効果・土構造の発現と直接的な関係を示していない。これらの結果が  $(p_c - p_o)$ 、 $(p_{uv} - p_{lv})$  への影響の大きな相違となっているものと考えられる。

## 7. Bjerrum 年代効果モデルの検証

Bjerrum の提案する年代効果モデル<sup>1)</sup>の基本的仮定は下記に示すとおり、遅延圧密が堆積年代の進行に伴い無限に進行するモデルであり、遅延圧密による土構造の変化と

表1 年代効果・土構造の発現と圧縮形態の変化および強度特性

深度	$Cc^* \sim f$ 関係図における基本的圧縮形態			年代効果・土構造	強度特性
	圧縮形態	$(p < p_{ov})$ 域の特徴	$(p \geq p_{ov})$ 域の特徴		
浅い地盤 $p < p_{oc}$	$Rc < 1.0$	$\Delta Cc^* / \Delta f =$ 一定を概成 弾性域と塑性域の形成が未発達でやや乱れたような圧縮形態	$Cc^*$ は $p$ の増大に伴い最小曲率点 $Cc^*_{uv}$ (上位降伏点) を示し、以後緩やかな増加傾向を示し $Cc^*_{at\ final}$ に収束 (圧縮性の硬化現象)。	堆積年代が若く、土構造が未成熟で遅延圧密が進行せず、緩いセメンテーション効果が発現	破壊ひずみ $\epsilon_f$ が大きく、強度が小さい。
限界有効土被り圧 $p = p_{oc}$	$Rc = 1.0$ 基準圧縮形態	$\Delta Cc^* / \Delta f =$ 一定を形成 弾性域と塑性域の区分が明瞭	$Cc^*$ は $p$ の増大に伴い折れ点 $Cc^*_{uv}$ (上位降伏点) を示し、以後一定のまま $Cc^*_{at\ final}$ に収束	有効土被り圧 $p_o$ が限界有効土被り圧 $p_{oc}$ より大きくなり、遅延圧密過程の段階に入り、遅延圧密効果と遅延圧密進行による強いセメンテーション効果が発現	破壊ひずみ $\epsilon_f$ が小さく、強度が大きい。
深い地盤 $p > p_{oc}$	$Rc > 1.0$	$\Delta Cc^* / \Delta f =$ 一定を形成 弾性域と塑性域の区分が明瞭	$Cc^*$ は $p$ の増大に伴いピーク値 $Cc^*_{uv}$ (上位降伏点) を示し、以後減少し $Cc^*_{at\ final}$ に収束 (圧縮性の軟化現象)。		

セメンテーションとの関連付けは特に述べられていない。

Iの仮定：遅延圧密はセメンテーションと独立に進行。

I-1:遅延圧密は、体積圧縮曲線の形状を変えることなく、体積比が体積圧縮曲線に平行的に減少。

IIの仮定：セメンテーションは圧密降伏応力近傍の体積圧縮曲線の形状を凹型に変化させる。

IIIの仮定：遅延圧密は、堆積年代とともに無限に進行。

Bjerrumの取り扱った地盤は、比較的有効土被り圧が大きく、海成沖積粘性土における $R_c \geq 1.0$ の年代効果の発現においてBjerrumモデルの仮定を検証する。すなわち、有効土被り圧の増加に伴い年代効果・土構造の発現は図23(b)に示すように概略 $\Delta C_c^*/\Delta f = \text{一定線}$ 上において上位降伏点の $C_c^*_{uv}$ を基準圧縮形態の $C_c^*_{uv}(=C_c^*_{at\ final})$ より大きくする。したがって、Iの仮定は当事例では説明できず、遅延圧密は土粒子間のセメンテーションを強化し、体積圧縮曲線の形状を変化させていると推定される。この上位降伏点の $C_c^*_{uv}$ は図21(a)に示すように、 $I_p$ と有効土被り圧によって多様に変化しており、遅延圧密は体積圧縮曲線の形状を変化させていることを示す。IIの仮定は、Iの仮定の検証で述べた通りであり、沖積粘性土で確認される。また、IIIの仮定については、上位降伏点の $C_c^*_{uv}$ の増加は、有効土被り圧の増大に伴い土構造を強化し、遅延圧縮と圧縮形態の変化 $R_c$ を抑制するように作用すると推定される。

## 8. 結論

本論文において、得られた主要な結論は以下に示すとおりである。

- 1) 広範囲な塑性指数域において $I_p$ による $\log f \sim \log p$ 関係への影響を、標準圧密試験の最終圧密圧力付近の $C_c^*_{4.7}/C_c^*_{9.4}$ によって精査した。この結果、 $\log f \sim \log p$ 関係は $I_p$ による影響が少なく、最終圧密圧力付近で収束する $C_c^*_{at\ final}$ が存在し、年代効果による影響を収束 $C_c^*_{at\ final}$ を用い定量的に把握することができる。 $e \sim \log p$ 関係は $I_p$ による影響が大きく、年代効果のみの影響を定量的に把握できない。
- 2) 沖積粘性土の圧縮形態を $\log f \sim \log p$ 関係、 $C_c^* \sim f$ 、 $C_c^* \sim p_m(p_m/p_c)$ 関係図により精査した結果、 $I_p \geq 20 \sim 30$ において $p_c$ 近傍の下位・上位圧力で $C_c^*$ に関する下位・上位降伏点が存在する。下位降伏点は、粘土骨格・構造が弾性域から塑性変形する開始点で、上位降伏点は粘土骨格・構造が破壊し急激に圧縮変形する開始点と推定される。年代効果は上位・下位降伏点により直接的に把握できる。
- 3) 土構造の破壊に直接関係する $(p_{uv} - p_v)$ は深度方向に増加する傾向を示し、 $p_0$ による土構造の発現状況が $\log f \sim \log p$ 関係に現れる。圧密降伏応力 $p_c$ は、 $p_v = p_0 < p_c < p_{uv}$

であり、土骨格が塑性変形を始め、土骨格が破壊する以前の応力を示す。 $p_c$ は土構造に間接的影響を受けているがその直接的な指標ではない。

- 4) 沖積粘性土の基本的圧縮形態は、対数圧縮指数比 $R_c = C_c^*_{uv}/C_{cat\ final}$  ( $C_c^*_{uv}$ :土構造が破壊する上位降伏点、 $C_{cat\ final}$ :概略収束値)により $R_c < 1.0$ ,  $R_c = 1.0$ ,  $R_c > 1.0$ の3種類に分類される。広範囲な塑性指数域における圧縮形態の変化は、 $I_p$ が同じ場合 $p_0$ の増大に伴い $R_c < 1.0 \rightarrow R_c = 1.0 \rightarrow R_c > 1.0$ と変化し、 $I_p$ によっても圧縮形態は大きく変化する。
- 5) 広範囲な $I_p$ 域において限界有効土被り圧 $p_{oc}$ で基準圧縮形態 $R_c = 1.0$ が存在する。基準圧縮形態は $C_c^* \sim f$ 関係で $p_{uv}$ 以下勾配 $\Delta C_c^*/\Delta f = \text{一定線}$ と $p_{uv}$ 以上 $C_c^* = C_c^*_{uv} = C_{cat\ final}$ の二直線からなる圧縮形態を示し、 $\log f \sim \log p$ 関係で理想的な二直線で表すことができる。基準圧縮形態は、圧縮形態の変化を追跡できる基準と考えることができる。
- 6) 土構造に係わる上位降伏点 $C_c^*_{uv}$ の変化は収束値 $C_{cat\ final}$ に対して構造に関する $R_c$ を介しパラメータ $p_0$ で概略表すことができる。上位降伏点 $C_c^*_{uv}$ の変化そのものが年代効果・土構造の発現によるものである。
- 7) 年代効果・土構造の発現過程と圧縮形態の変化について、 $R_c < 1.0$  ( $p_0 < p_{oc}$ )の圧縮形態は、 $C_c^* \sim f$ 関係で $\Delta C_c^*/\Delta f = \text{一定線}$ が概略形成され、遅延圧密が進行する段階に到らず、自然地盤自体が土構造の未成熟な地盤と推定される。土構造に係わる $(p_{uv} - p_v)$ は $R_c = 1.0$ で値を有しており、 $R_c < 1.0$ の圧縮形態は上に凸な形状を示すが、緩いセメンテーションを有する。
- 8)  $R_c > 1.0$  ( $p_0 > p_{oc}$ )の圧縮形態は、 $C_c^* \sim f$ 関係で明確な $\Delta C_c^*/\Delta f = \text{一定線}$ が形成され、遅延圧密の進行の段階に到り、年代効果は $\Delta C_c^*/\Delta f = \text{一定線}$ 上または遅延圧密分平行移動した $\Delta C_c^*/\Delta f = \text{一定線}$ 上で進行する。 $C_c^*_{uv}$ は遅延圧密に伴いセメンテーションにより土構造が発達し、 $C_c^*_{uv}$ が $C_c^*_{uv} = C_{cat\ final}(= \text{基準圧縮形態の } C_c^*) \times R_c$ と大きくなり基準圧縮形態を変えている。
- 9) 沖積粘性土地盤の年代効果の発現は、 $R_c$ と $\Delta f = (R_c - 1.0) \times C_{cat\ final}/A$ により定量的に判定できる。 $\Delta f$ は $R_c = 1.0$ の上位降伏点を基準に土構造が破壊されるまでの土構造形成による土骨格の強さに関係する。
- 10) 年代効果の総量 $(p_{uv} - p_v)$ は、 $R_c = 1.0$ のコンターにより内容が異なり、 $R_c < 1.0$ では緩いセメンテーションを、 $R_c \geq 1.0$ では遅延圧密により強化されたセメンテーションを有すると推定される。
- 11)  $R_c \geq 1.0$ の圧縮形態からBjerrum年代効果モデルの基本的仮定を検証した。基準圧縮形態を基準に有効土被り圧の増大に伴い圧縮形態が全て変化しており(体積圧縮曲線の変化)、遅延圧密は粘土骨格のセメンテーションを強化している(遅延圧密とセメンテーションが関係)。Bjerrumの年代効果モデルの基本的仮定は沖積粘性土地盤の検証



結果と異なる。

**謝辞**：中電技術コンサルタント株式会社、小笠原弘典氏、前田邦男氏、大畑徹夫氏、入江純一氏、中国地下工業株式会社、田原正登氏他の方々に論文作成に多くの支援を頂きました。村田秀一山口大学教授、林重徳佐賀大学教授、内田一郎九州大学名誉教授を始め同窓の研究室の諸先輩から論文作成に支援を頂きました。ここに記して深謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) Bjerrum, L. : Engineering geology of Norwegian normally-consolidated marine clays as related to settlements of buildings, *Geotechnique*, Vol. 17, No. 2, pp. 83-118, 1967.
- 2) Bjerrum, L. and Lo, K. Y. : Effect of aging on the shear strength of a normally consolidated clay, *Geotechnique*, Vol. 13, No. 2, pp. 147-157, 1963.
- 3) 半沢秀郎, 岸田隆夫 : 年代効果を受けた粘土の非排水強度特性, 土と基礎, Vol. 30, No. 12, pp. 5-10, 1982.
- 4) 土田 孝, 小林正樹, 水上純一, 田中政典 : 高温再圧密による海成粘土の年代効果の再現, 港湾技術研究所報告, 第28巻 第1号, pp. 121-147, 1989.
- 5) 吉田義和, 乗安直人, 兵動正幸, 三浦哲彦, 三宅健一 : 塑性の異なる堆積地盤の工学的性質について, 第29回土質工学研究発表会, 土質工学会, pp. 59-62, 1994.
- 6) 吉田義和, 乗安直人, 兵動正幸, 三浦哲彦, 三宅健一 : 自然堆積地盤の年代効果について, 第30回土質工学研究発表会, 土質工学会, pp. 455-458, 1995.
- 7) Noriyasu, N., Hyodo, M. and Miura, N. : Mechanism of aging effect of alluvial marine clays with wide range of plasticity, *Coastal Geotechnical Engineering in Practice*, pp. 119-124, 2000.
- 8) Burland, J. B. : On the Compressibility and Shear Strength of Natural Clays, *Geotechnique* 40., No. 3., pp. 329-378, 1990.
- 9) テルツァギ・ペック : 土質力学 基礎編, 丸善株式会社, pp. 53-71, 1975.
- 10) Mesri, G. and Godlewski, P.M. : Time and stress-compressibility interrelationship, *JGED, ASCE*, Vol. 100, No. GT7, pp. 763-786, 1974.
- 11) 乗安直人, 兵動正幸, 三浦哲彦, 高橋修三 : 年代効果と降伏対数圧縮指数の物理的意味, 第36回地盤工学研究発表会, 地盤工学会, pp. 277-278, 2001.
- 12) 土質工学会 : 土質試験の方法と解釈 第2章, pp. 186-200, 1990.
- 13) 土質工学会 : ジオテクノート2 中間土 砂か粘土か, pp. 7-54, 1994.
- 14) 小川富美子, 松本一明 : 港湾地域における土質工学諸定数の相関性, 港湾技術研究所報告, Vol. 17, No. 3, pp. 3-89, 1978.
- 15) Hanzawa, H. and Adachi, K. : Overconsolidation of alluvial clays, *Soils and Foundations*, Vol. 23, No. 4, pp. 106-118, 1983.
- 16) Hanzawa, H. : Undrained strength characteristics of normally consolidated aged clay, *Soils and Foundations*, Vol. 23, No. 3, pp. 39-49, 1983.
- 17) 赤井浩一 : 大阪湾海底地盤の土質工学的諸問題, 土木学会論文集No. 463/III-22, pp. 1-14, 1993.
- 18) Casagrande, A. : The determination of the pre-consolidation load and its practical significance, *Proc. 1st Int. Conf. Soil Mech.*, pp. 3-60, 1936.
- 19) 網干寿夫 : 土質力学 第4章圧密, 技報堂, pp. 340-342, 1973.

(2002. 7. 31 受付)

## INFLUENCE OF COMPRESSION SHAPES OF MARINE ALLUVIAL CLAY GROUND OWING TO AGING EFFECT

Naoto NORIYASU, Masayuki HYODO and Norihiko MIURA

This paper investigated the mechanism and the degree of the aging effect on marine alluvial clay with a wide range of plasticity. In this study, consolidation paths using a logarithmic compression index  $C_c'$  to  $p$  as well as to  $f$  are adopted because of little affectation with  $I_p$ . ① Lower and upper yield points close to  $p_c$  are clearly shown. The upper yield points is directly related with the initiation of failure of the soil structure. ② The development of the aging effect influences fundamental compression shapes, the logarithmic compression index ratio  $R_c$  became larger with the increase of effective overburden pressure. ③ Standard compression type specific to  $I_p$  exists at critical effective overburden pressure. ④ Fundamental assumptions of Bjerrum's aging effect model are verified.