

第6章 アイソタック概念の適用性

白竜湖軟弱地盤における高速道路盛土の長期沈下対策は、関口・太田による弾塑性モデルまたは弾粘塑性モデル^[1]と比較のうえ、 $\log t$ 法^[2]により沈下量を設定して計画したものである。

関口・太田によるモデルは、Bjerrumの疑似過圧密効果の概念^[3]、^[4]、^[5]と調和的で、両者とも圧密試験の結果を基に対象土層の堆積年代を知る式を導出できる。一方、地盤が堆積した年代は、土層に含まれる有機物の放射性炭素の分析や、火山灰を分析して対比することで地質学的に推定できる。関口・太田によるモデルやBjerrumの概念から計算した堆積年代 t_i と、地質学的に推定した堆積年代 t_a は、载荷過程に違いがあるものの概ね等しくなりそうなものである。ところが、前章で示したとおり、両者は大きく乖離してしまい、多くの場合で t_i は t_a より数桁違いで小さくなる。言い換えれば堆積後、数万年経過しているはずの土層の年齢が、計算結果ではゼロ歳になってしまう。

前章では、この原因を試料採取時の「乱れ」によるものと考え、乱れた試料の特定を試みた。その結果、検討したすべての指標による「乱れの程度」は「 t_i と t_a の乖離の程度や傾向」と無関係であった。逆に、乱れの小さい試料の方が乱れの大きい試料より t_i が数桁違いに小さくなる指標も複数あった。乱れた試料を特定できれば、強度試験の結果の補正を検討すれば良いが、既往研究で「乱れの程度を示す」とされた何れの指標も、 t_i と t_a の比較において乱れた試料を特定することができなかった。試料の乱れが応力解放によるものと考えれば、すべての試料の試験結果を補正するという考え方もあろう。その場合、乱れの大きさは試料の採取深度に比例するはずであるが、そのような傾向を示す指標も確認できなかった。

本章では、白竜湖軟弱地盤の更新統粘性土が、アイソタック概念^[6]を適用できることを示したうえで、その結果が示す意味を述べる。そのうえで、 t_i のバラつきのもう一つの要因について検討してみる。

6-1 序論

アイソタック概念は、圧縮曲線や圧密降伏応力がひずみ速度に依存するという概念である。図 6-1 は田中と林による概念図^[7]を基に作図したもので、本稿で用いている表現に合わせて圧密圧力を鉛直方向の有効応力としている。図は直線で表しているが、特に直線である必要はなく、ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ に応じて $\epsilon - \log \sigma'$ の関係が変化することを表している。 $\dot{\epsilon}$ が大きくなれば圧縮曲線が右に移動して圧密降伏応力が大きくなる。逆に $\dot{\epsilon}$ が小さくなれば、圧密降伏応力が小さくなる。Crawford^[8]の報告や、Imai^[9]による再構成性粘土の実験結果等、多数の報告がある。また、第4章の長期沈下予測に用いた解析コード(表 4-7)のうち、CONAN IVはアイソタック概念を基にしたモデルを使用している。

図 6-1 では、 $\dot{\epsilon}$ を10倍変化させたときの応力変化 $\Delta\sigma'_v$ を式(6-1)のとおり定義することでひずみ速度依存性を表現している。

$$R = \frac{\sigma'_{v1} - \sigma'_{v2}}{\sigma'_{v1}} = \frac{\Delta\sigma'_v}{\sigma'_{v1}}$$

$$\Delta\sigma'_v = R\sigma'_{v1}$$

(6-1)

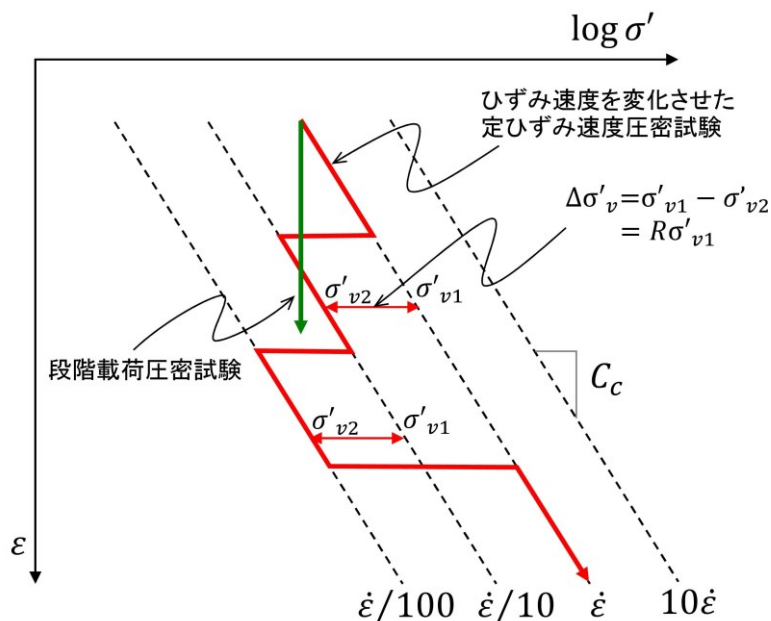


図 6-1 アイソタック概念に基づいたひずみと圧密圧力の関係の概念

図 6-1 は、ひずみ速度を変化させた定ひずみ速度圧密試験を行わなければ、実際に得ることができない。そのような特殊な土質試験は、通常実務において実施することはない。白竜湖軟弱地盤が極めて特殊な地盤であるとしても、高速道路建設を計画するうえでは事情は同じで、通常の定ひずみ速度圧密試験^[9]の結果が有機質土と合わせて100ケースのデータがあるのみである。

図 6-2 は、渡部らが提案 [11], [12], [13], [14]しているアイソタック概念の表現である。図中の曲線は統合近似曲線と呼ばれ、横軸にひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ ，縦軸に $\dot{\epsilon} = 1.0 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ のときの値で正規化した圧密降伏応力（あるいは、それと幾何学的に同等の値）をとり、両者の関係を示したもので、世界各地の粘土がこの曲線に適合するとされる。白竜湖軟弱地盤の粘性土は、国内各地の海成粘土と調和的であることを第3章で既に述べている。それであれば、図 6-2 の統合近似曲線は白竜湖軟弱地盤の粘性土にも適合できるはずである。

図 6-2 にプロットするデータは、JIS A 1227 に規定される定ひずみ速度载荷による圧密試験と、長期圧密試験を併せて行うことで求めることができる。白竜湖軟弱地盤では、有機質土と合わせて 100 の試料で定ひずみ速度圧密試験を実施しており、そのうち 30 の試料で長期圧密試験を行っている。これらの試験結果で、アイソタック概念の適用性を確認する。

本章では、まず、次節 6-2 で渡部らが考案したデータ整理の方法 [13], [15]について簡単に触れる。6-3 で白竜湖軟弱地盤のデータを渡部らの方法を用いて整理する。6-4 で、得られた結果について、その意味を考察する。

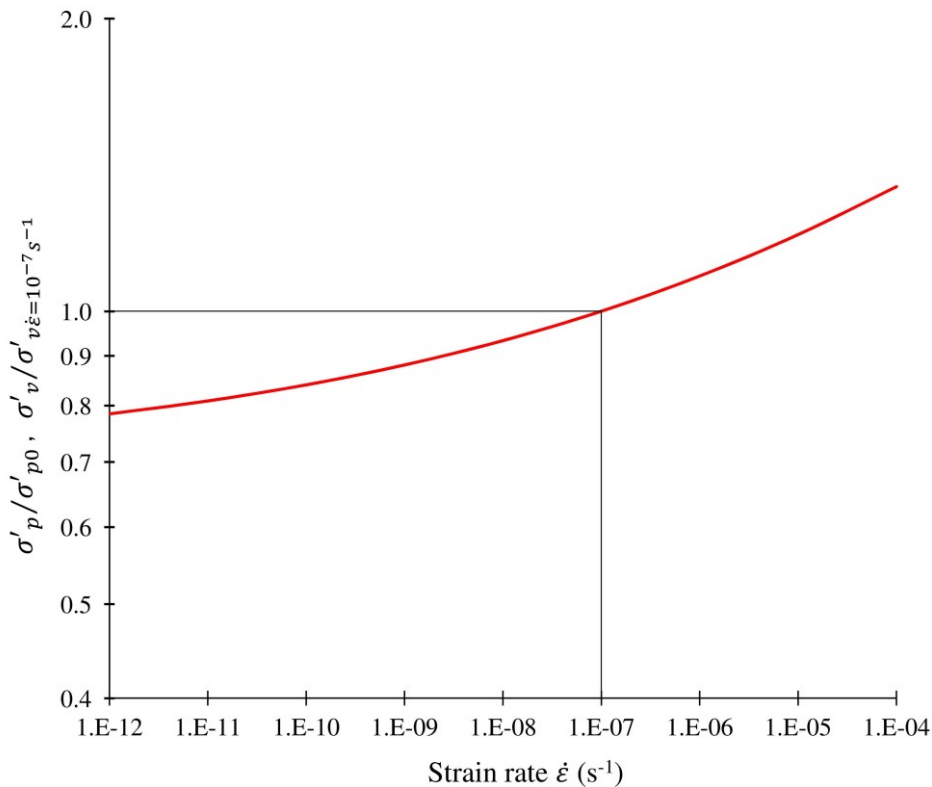


図 6-2 渡部らによるアイソタック概念の表現 [11], [12], [13], [14]

6-2 データ整理の手順

渡部らのデータ整理方法^[13],^[14]は, Leroueil et al.^[16]の方法に立脚している. ここでは, 次の各式を用いる.

$$\varepsilon_{vp} = \varepsilon - \varepsilon_e \tag{6-2}$$

$$\frac{\sigma'_v}{\sigma'_{vc}} = f(\varepsilon_{vp}) \tag{6-3}$$

$$\sigma'_{vc} = g(\dot{\varepsilon}_{vp}) \tag{6-4}$$

σ'_v は鉛直方向の有効圧密圧力, σ'_{vc} は有効圧密降伏応力である. ε_{vp} は粘塑性ひずみで, 式(6-2)では全体のひずみから弾性ひずみ ε_e を差し引いている. 弾性ひずみ ε_e は, ひずみで表した圧縮曲線上の $(\sigma'_v, \varepsilon) = (1kN/m^2, 0)$ および $(\sigma'_{vi}, \varepsilon_i)$ の2点を通る直線で定義される(図6-3(a)). (σ'_{vi} は有効土被り圧, ε_i は $\sigma'_v = \sigma'_{vi}$ のときの全ひずみ) $\dot{\varepsilon}_{vp}$ は粘塑性ひずみ速度である.

$\varepsilon - \log \sigma'_v$ から ε_e を差し引いて $\varepsilon_{vp} - \log \sigma'_v$ 曲線を得る. $\varepsilon_{vp} - \log \sigma'_v$ 曲線で圧密降伏応力 $\sigma'_{vc\dot{\varepsilon}_{vp}}$ を求めて σ'_v を正規化することで, 基準圧縮曲線(図6-3(b))を得る. 基準圧縮曲線は式(6-3)に相当する.

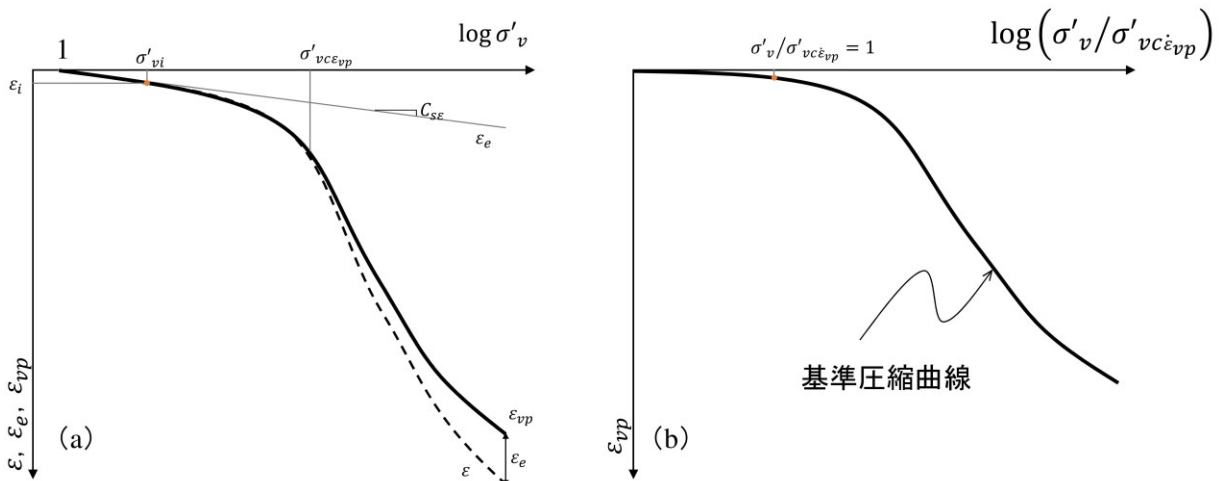


図 6-3 定ひずみ圧密試験の圧縮曲線 (a) ε_e と ε_{vp} の定義, (b) 基準圧縮曲線^[13],^[14]

次に、長期圧密試験の結果で $\varepsilon - \log t$ を整理し、EOP (End of primary) 以降で $\dot{\varepsilon} = 1 \times 10^{-5}$ (s^{-1}) から $\dot{\varepsilon} = 1 \times 10^{-9}$ (s^{-1}) に相当する位置で ε を読み取る (図 6-4)。なお、EOP は \sqrt{t} 法で理論圧密度 100% に相当する変位計の読み d_{100} により定義する。

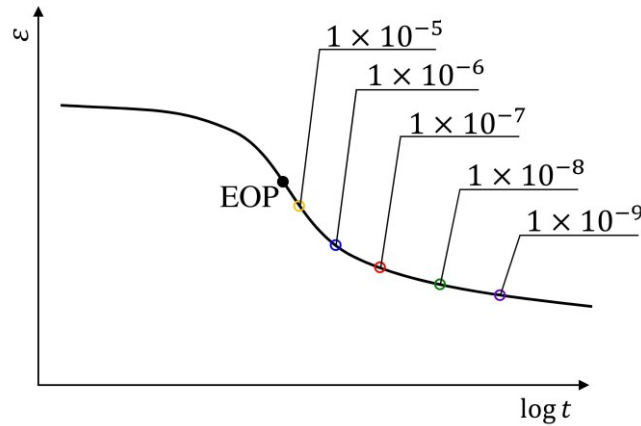


図 6-4 長期圧密試験のデータの整理

上記の長期圧密試験で読み取った EOP 以降の ε は、実質的に ε_{vp} とみなせる。同様に $\dot{\varepsilon}$ は $\dot{\varepsilon}_{vp}$ とみなせる。図 6-4 で得た、各ひずみ速度に対応した ε と圧密圧力の関係から、図 6-3 (b) の基準圧密曲線を平行移動して図 6-5 を得る。図 6-5 の各曲線から降伏点を読み取って $\sigma'_{vc\dot{\varepsilon}_{vp}}$ を乗じることで各ひずみ速度に対応した圧密降伏応力が得られる。これらの圧密降伏応力は、式 (6-4) に相当する。ここでは、 $\sigma'_{vc\dot{\varepsilon}}$ とする。

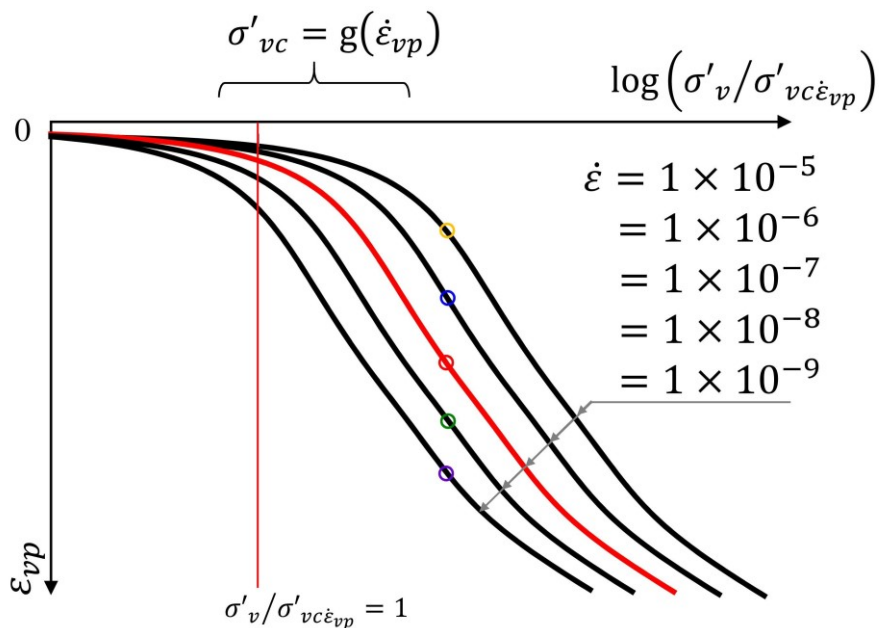


図 6-5 長期圧密試験の結果のフィッティング

図 6-2 に示した曲線は、式 (6-5) で表すことができる [17] とされる。

$$\ln \frac{\sigma'_{vc} - \sigma'_{vcL}}{\sigma'_{vcL}} = c_1 + c_2 \ln \dot{\epsilon}_{vp} \quad (6-5)$$

$\sigma'_{vcL} / \sigma'_{vc0} = 0.7$, $c_1 = 0.935$, $c_2 = 0.107$ としたとき、式 (6-5) で表される曲線は統合近似曲線と呼ばれ、世界各地の粘土に適合する [13]、[14] とされる。

図 6-5 で求めた圧密降伏応力 $\sigma'_{vc\dot{\epsilon}}$ と、各ひずみ速度との関係について、式 (6-5) が成り立つものとして繰り返し計算によりパラメータを設定し、関係式を求める。得られた関係式において、 $\dot{\epsilon} = 1 \times 10^{-7} \text{ (s}^{-1}\text{)}$ のときの圧密降伏応力を σ'_{vc0} とし、他のひずみ速度における圧密降伏応力 σ'_{vc} を正規化する。

上記の正規化した圧密降伏応力について、 $\dot{\epsilon}$ との関係を両対数軸上にプロットすると、図 6-6 を得る。

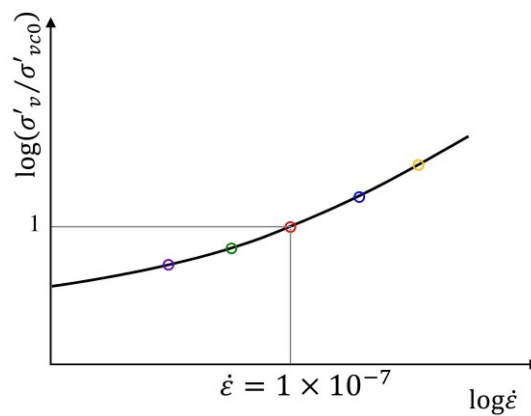


図 6-6 $\log(\sigma'_v / \sigma'_{vc0}) - \log \dot{\epsilon}$ 関係

6-3 アイソタック概念の適用

白竜湖軟弱地盤における定ひずみ速度圧密試験と長期圧密試験の結果について、前節に述べた手順で整理し、統合近似曲線の適合性を確認する。

6-3-1 基準圧縮曲線

図 6-7 は、定ひずみ速度圧密試験のデータを用いて基準圧縮曲線を求めた例である。図 (a) に示されている直線が ϵ_e に相当する。図 (a) の圧縮曲線から ϵ_e を差し引いて図 (b) を得る。図 (b) で圧密降伏応力 $\sigma'_{vc\dot{\epsilon}_{vp}}$ を求めて、圧密応力を正規化して図 (c) を得る。図 (c) が基準圧縮曲線となる。なお、図 (d) は、図 (b) の一部を拡大したもので、圧密降伏応力 $\sigma'_{vc\dot{\epsilon}_{vp}}$ を三笠法で求めていることを示している。

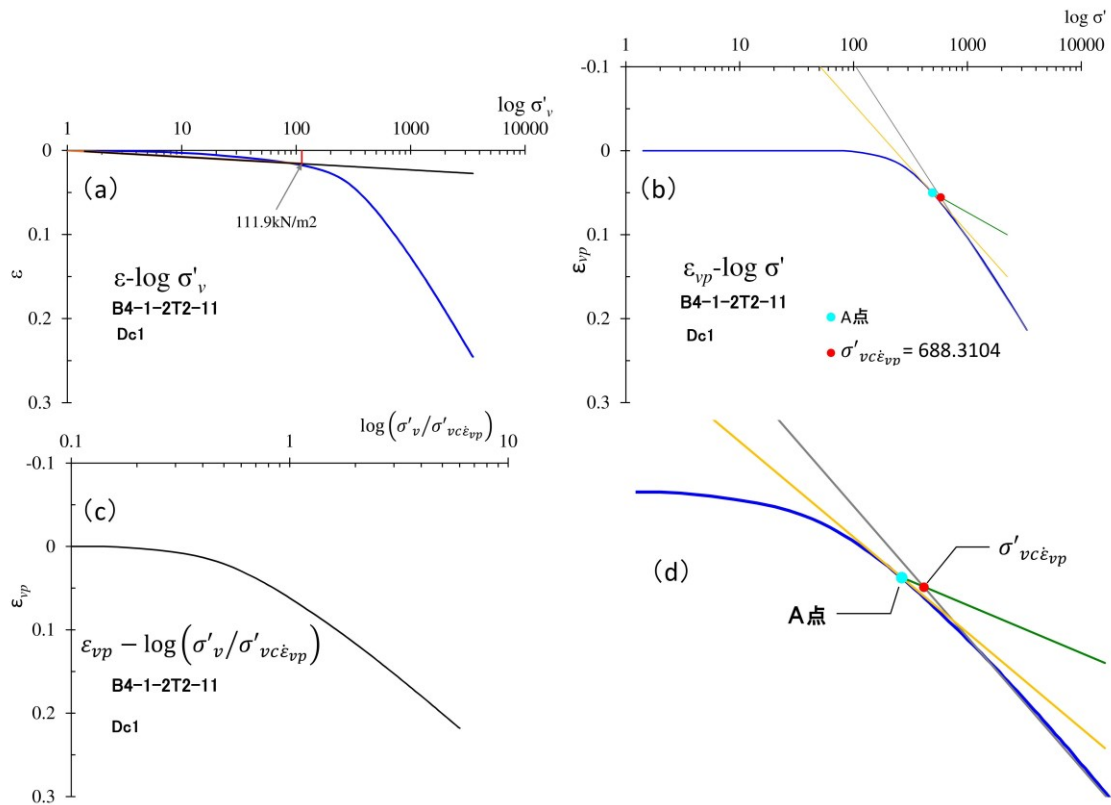


図 6-7 基準圧縮曲線を求める過程の一例

図 6-8 に、実際に基準圧縮曲線を求めた結果を示す。図 6-8 (a) が更新統粘性土と同有機質土の全 30 データで、(b) は (a) から粘性土のみとしたもの。(c) は同様に有機質土のみとしたものである。特に粘性土については、かなり大きなバラつきがある。

第6章 アイソタック概念の適用性

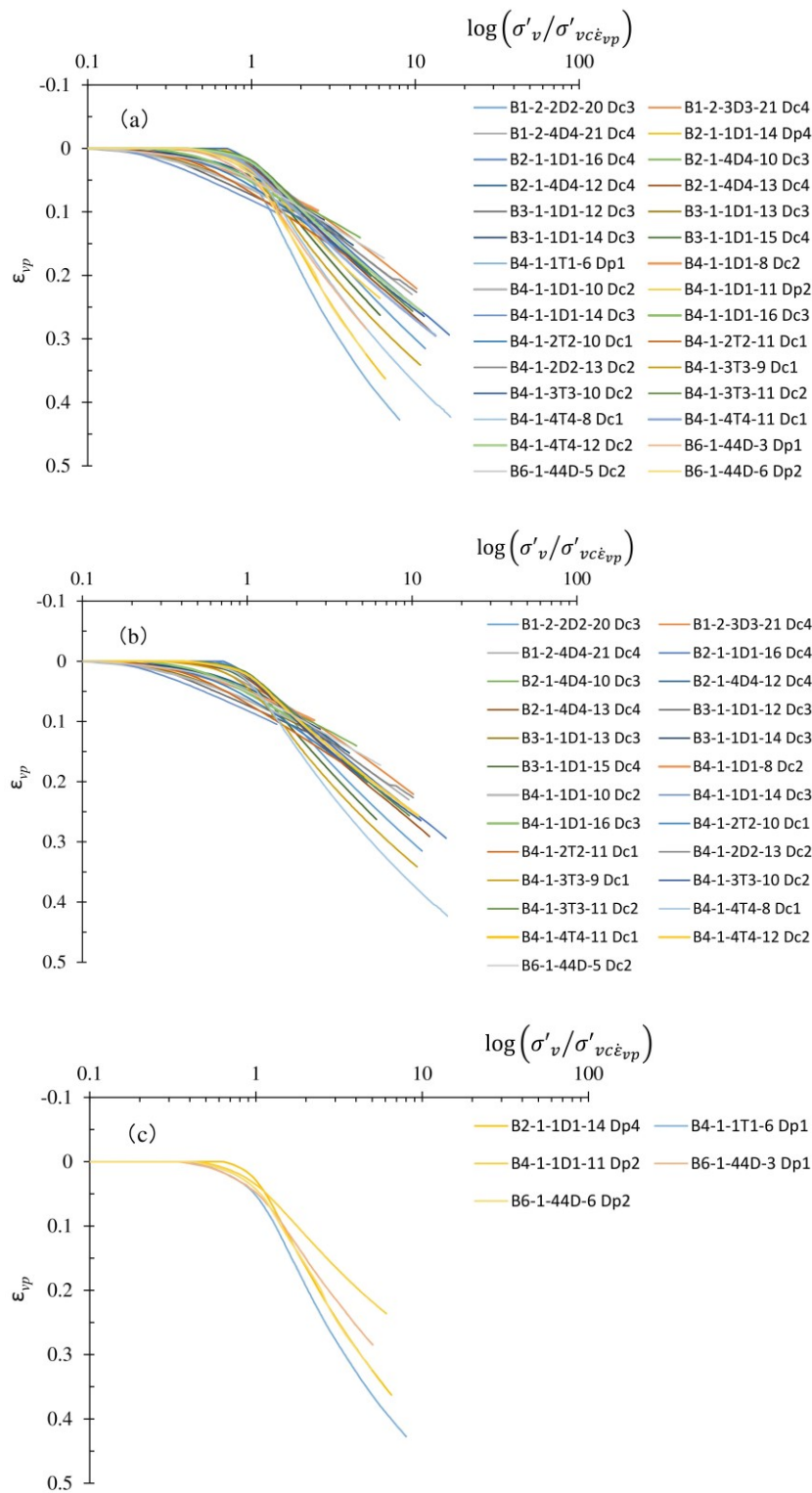


図 6-8 基準圧縮曲線 a:全データ b:粘性土 c:有機質土

6-3-2 ひずみ速度と载荷時間の関係

渡部らは、長期圧密試験の結果は、一次圧密終了時点 (EOP) 以降のデータを使用する [13] としている。EOP は \sqrt{t} 法で d_{90} を求めたうえで、式 (6-6) [18] で求める (図 6-9)。

$$d_{100} = \frac{10}{9}(d_{90} - d_0) + d_0 \tag{6-6}$$

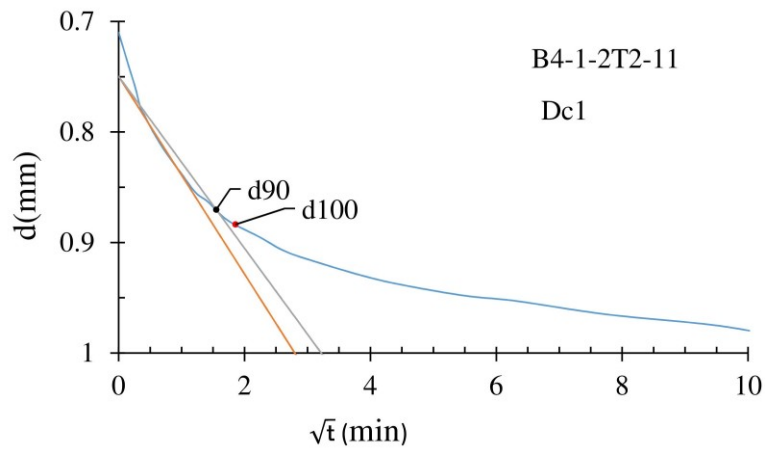


図 6-9 \sqrt{t} 法による EOP の設定

図 6-10 に、長期圧密試験のデータで $\varepsilon - \log t$ を整理した例を示す。この図において、各ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}$ に対応した ε を読み取り、 ε_{vp} とし、 $\sigma' - \dot{\varepsilon}_{vp} - \varepsilon_{vp}$ データセットを得る。図 6-11, 図 6-12 に実際に整理した全結果を示す。

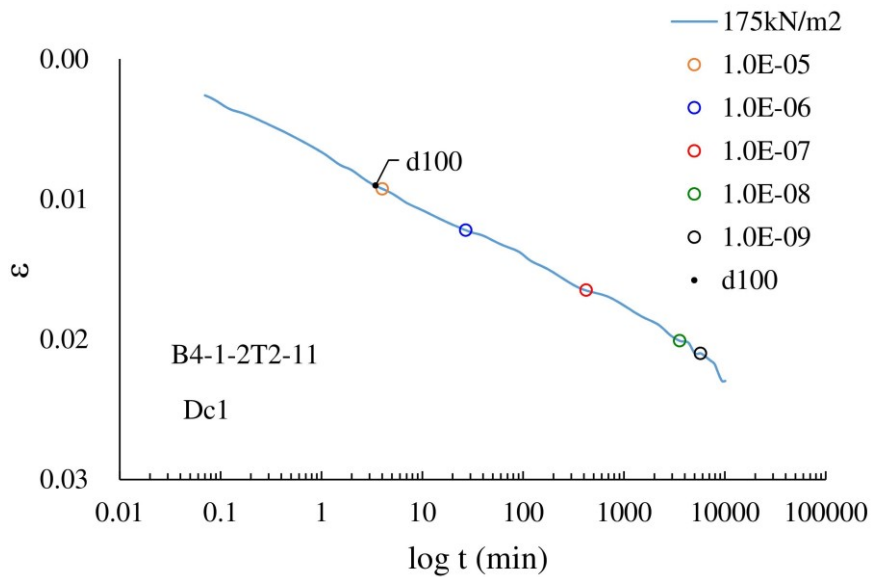


図 6-10 長期圧密試験の $\varepsilon - \log t$ の一例

第6章 アイソタック概念の適用性

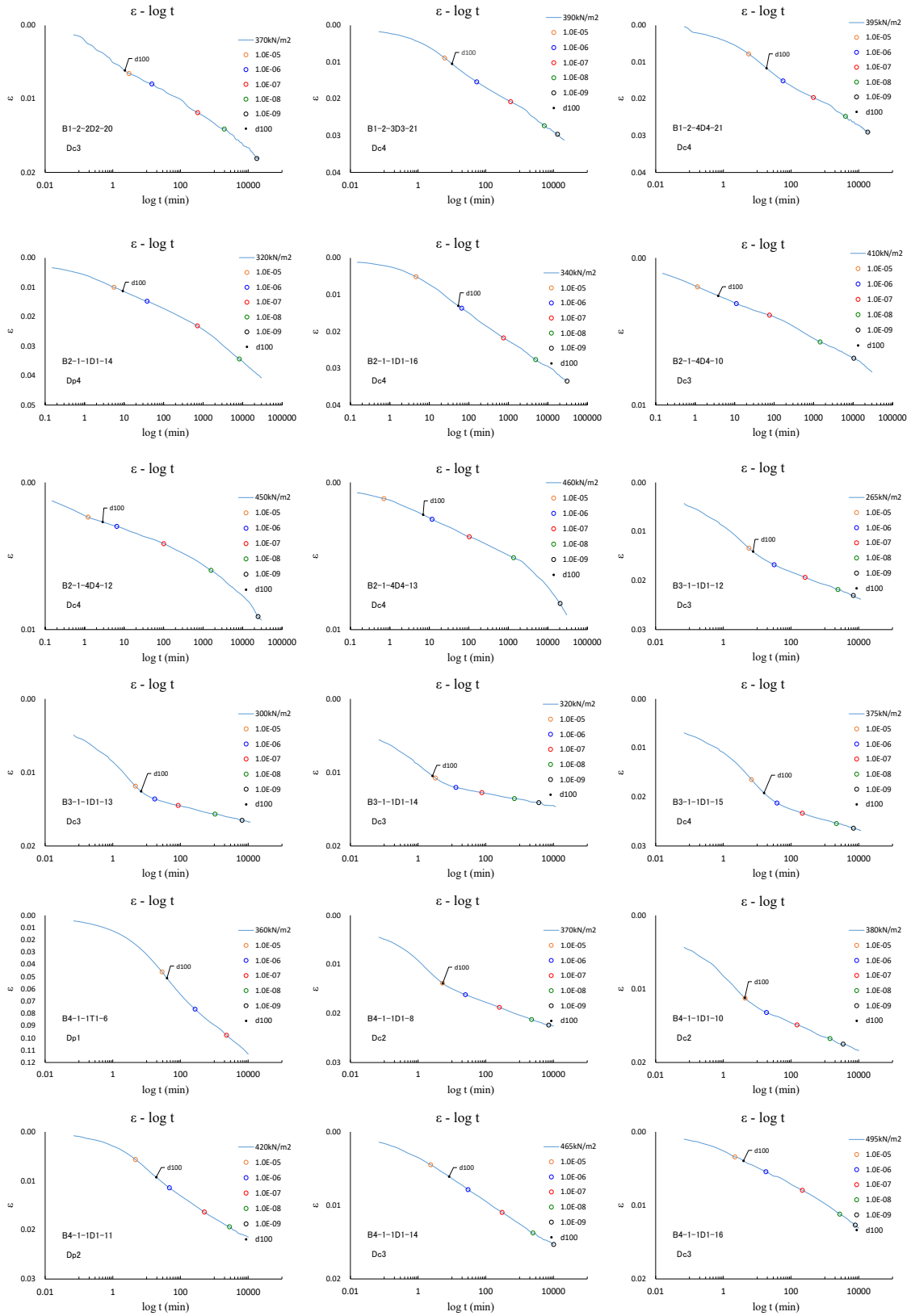


図 6-1.1 長期圧密試験の $\epsilon - \log t$ (1/2)

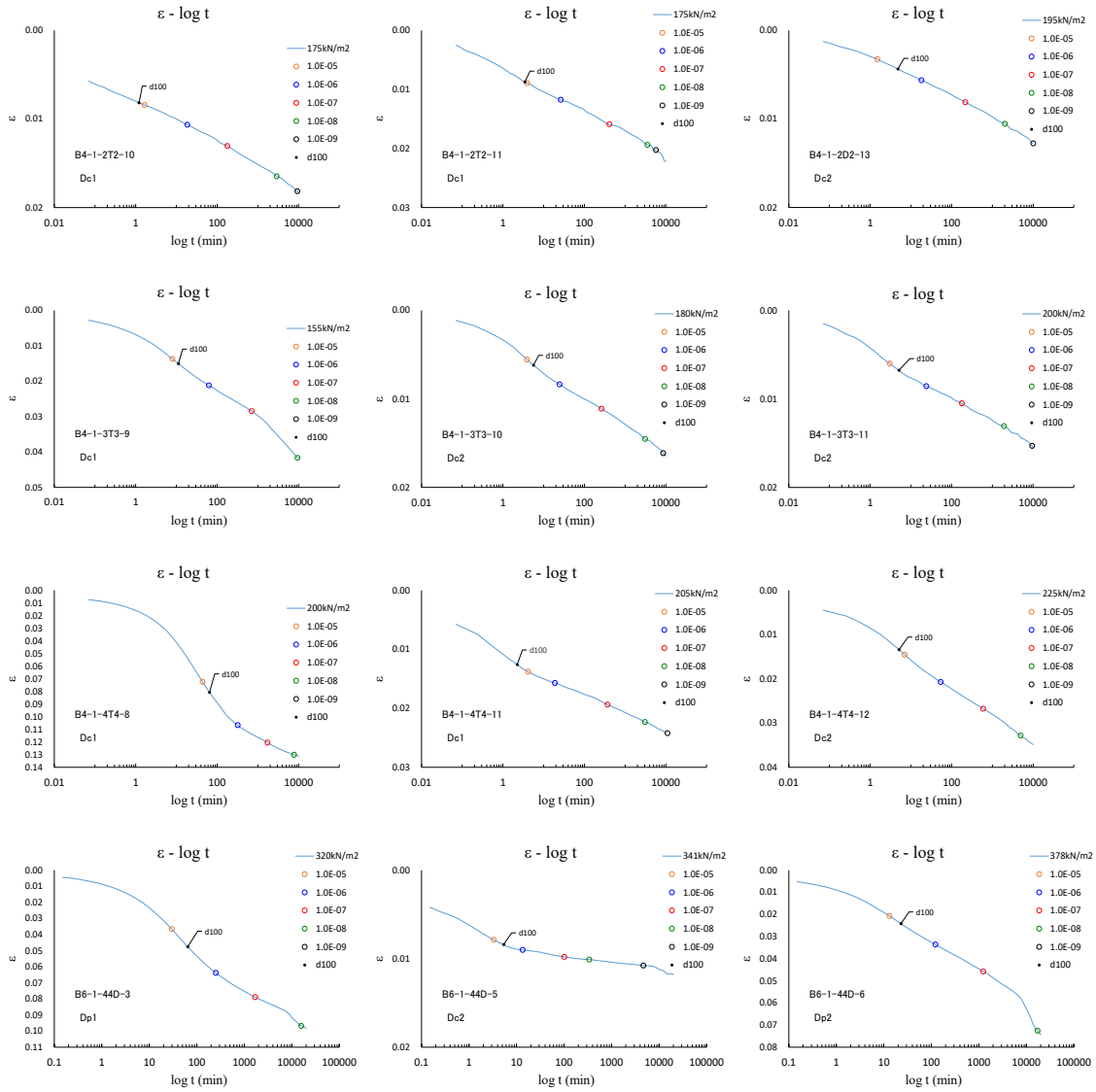


図 6-1 2 長期圧密試験の $\varepsilon - \log t$ (2/2)

長期圧密試験は、実際の増加荷重を想定した圧密圧力で試験を行うため、正規圧密領域の試験になっていない場合が多い。また、多くの場合で EOP が $\dot{\varepsilon} = 1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ の位置より後に記録された。この場合、本来は EOP 以降のデータを処理すべきであるが、本研究ではデータのバラつきの評価に主眼を置いているため、ここではあえて EOP の前後関係は無視して処理を進めるものとした。

6-3-3 ひずみ速度と圧密降伏応力の関係

図 6-1 3は、長期圧密試験で得た $\sigma' - \varepsilon_{vp} - \varepsilon_{vp}$ データセット (図 6-1 3 (a)) を基準圧縮曲線にフィッティングする過程について、一例を示したものである。長期圧密試験の圧密圧力を図 6-7 (b) で求めた $\sigma'_{vc\varepsilon_{vp}}$ で正規化し、基準圧縮曲線を平行移動させて長期圧密試験のデータセットにフィッティングする (図 (b))。図 (b) で、各ひずみ速度に対応した圧密降伏応力 $\sigma'_{vc\varepsilon}$ を求める。各ひずみ速度と $\sigma'_{vc\varepsilon}$ の関係をプロットすると図 (c) を得る。

(図 (c) には、図 (b) の基になった定ひずみ速度圧密試験における圧密降伏応力を、参考に示してある。) この関係から式 (6-5) のパラメータを求め、データセットに固有の関係式を得る。なお、渡部らは、 $\sigma'_{vc}/\sigma'_{vcL} = 0.7$ と仮定して他の2つのパラメータを求めて良いとしている [13]が、今回は、すべてのパラメータを対象にした反復計算で関係式 (図 (c) の赤文字) を求めている。

得られた関係式で、各ひずみ速度に対応した圧密降伏応力 σ'_{vc} を改めて得る。関係式で、ひずみ速度 $\dot{\varepsilon} = 1 \times 10^{-7} (s^{-1})$ のときの圧密降伏応力を σ'_{vc0} とし、他のひずみ速度における圧密降伏応力 σ'_{vc} を正規化する。ひずみ速度と正規化圧密圧力の関係をプロットすると、図 (d) のとおりとなる。図 (d) には、図 6-2 の統合近似曲線を併せて示し、比較してある。(図 (d) では、 $\dot{\varepsilon} = 1 \times 10^{-7} (s^{-1})$ において縦軸が1となるよう、統合近似曲線のパラメータを調整してある。)

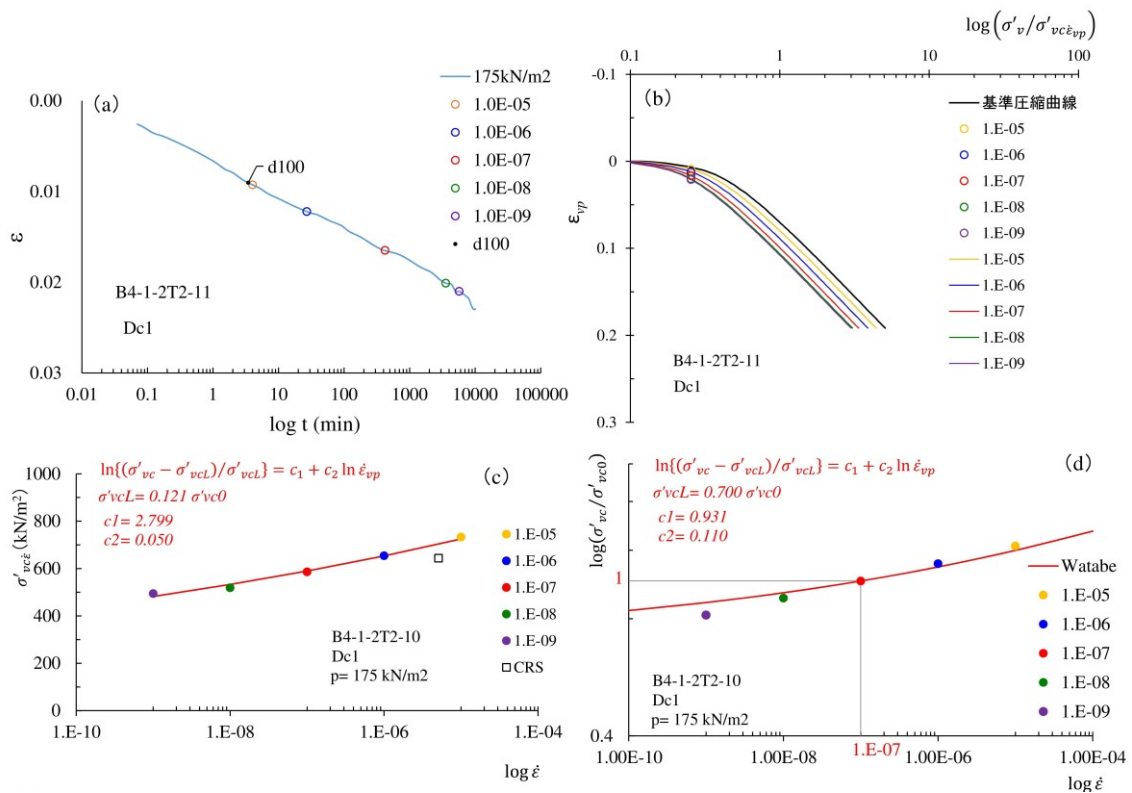


図 6-1 3 基準圧縮曲線のフィッティングとパラメータの設定

なお、 σ'_{vc0} を求める際の $\dot{\epsilon}$ は、標準圧密試験終了時のひずみ速度に概ね相当することが求められる。渡部らは、これを標準圧密試験における試験開始24時間後のひずみ速度に近い値として、 $\dot{\epsilon} = 1 \times 10^{-7} \text{ (s}^{-1}\text{)}$ としている。図6-14は、今回評価した試料における標準圧密試験のデータで、ひずみ速度と載荷時間の関係を整理したものである。載荷24時間後のひずみ速度は、 $\dot{\epsilon} = 1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-8} \text{ (s}^{-1}\text{)}$ の範囲にあり、「 $\dot{\epsilon} = 1 \times 10^{-7} \text{ (s}^{-1}\text{)}$ に対応する圧縮曲線から σ'_{vc0} を求める」という作業方針を踏襲して良いものとする。

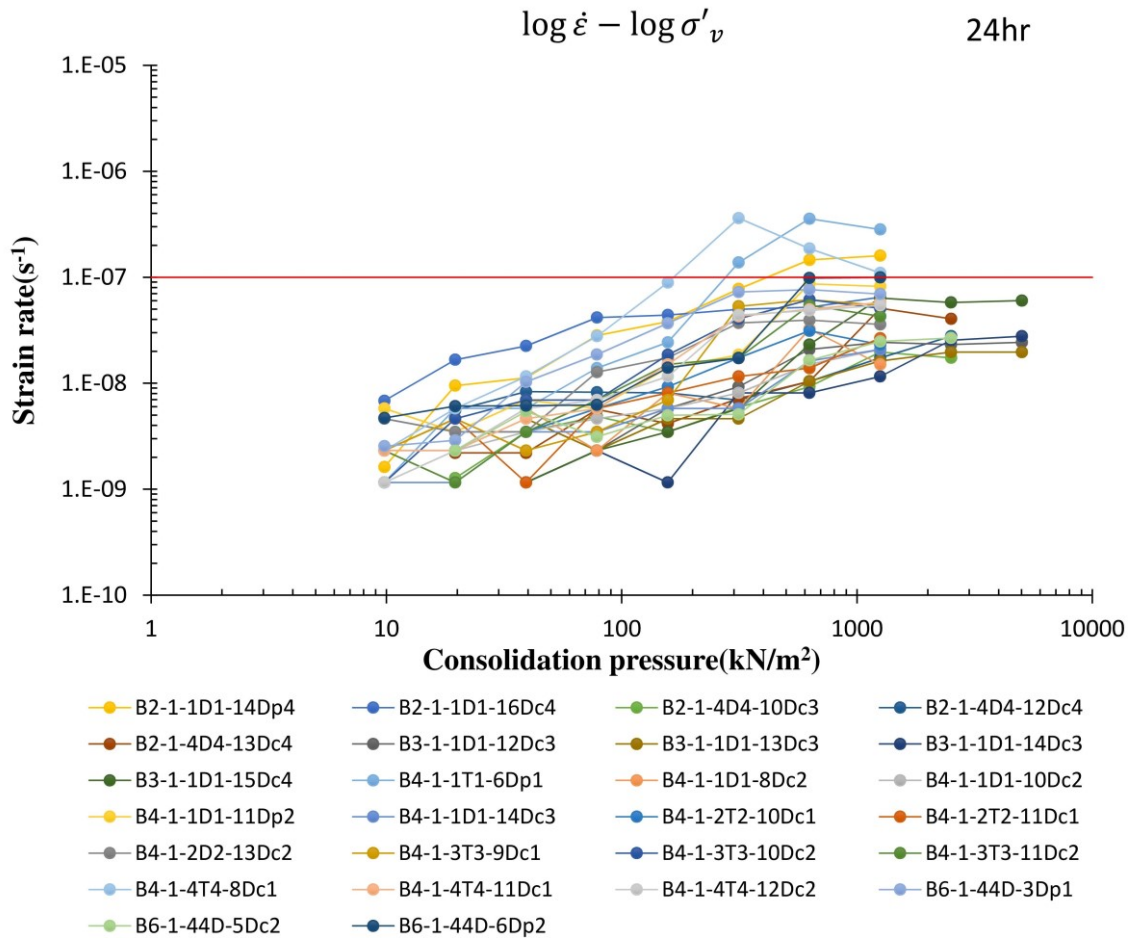


図 6-14 標準圧密試験における ひずみ速度の確認

図6-15、図6-16に、更新統粘性土について実際に基準圧縮曲線をフィッティングした結果を示す。長期圧密試験で用いた圧密圧力が小さいため、ほとんどのデータが正規圧密領域でのフィッティングにならなかった。

第6章 アイソタック概念の適用性

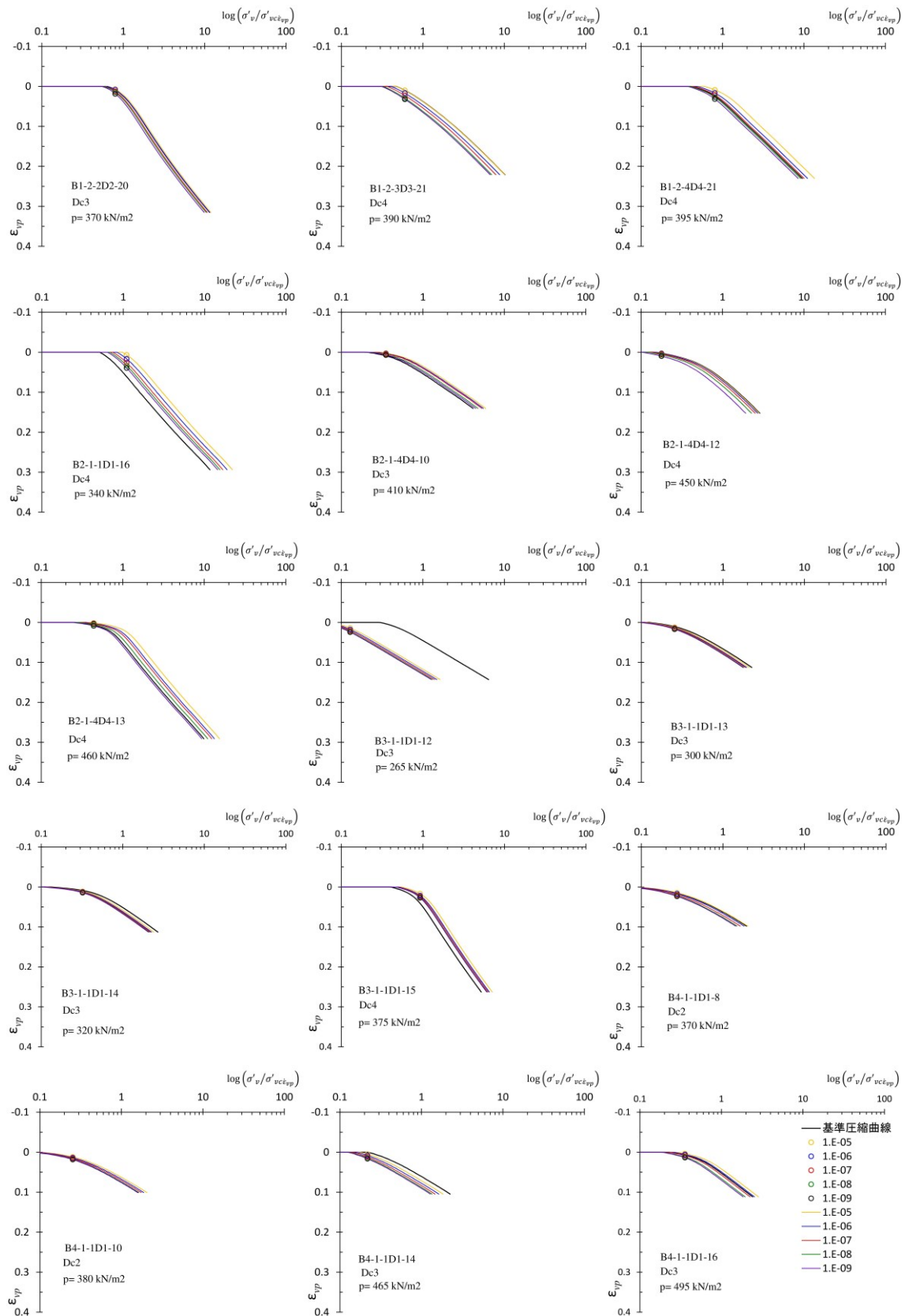


図 6-15 基準圧縮曲線のフィッティング (粘性土) 1/2

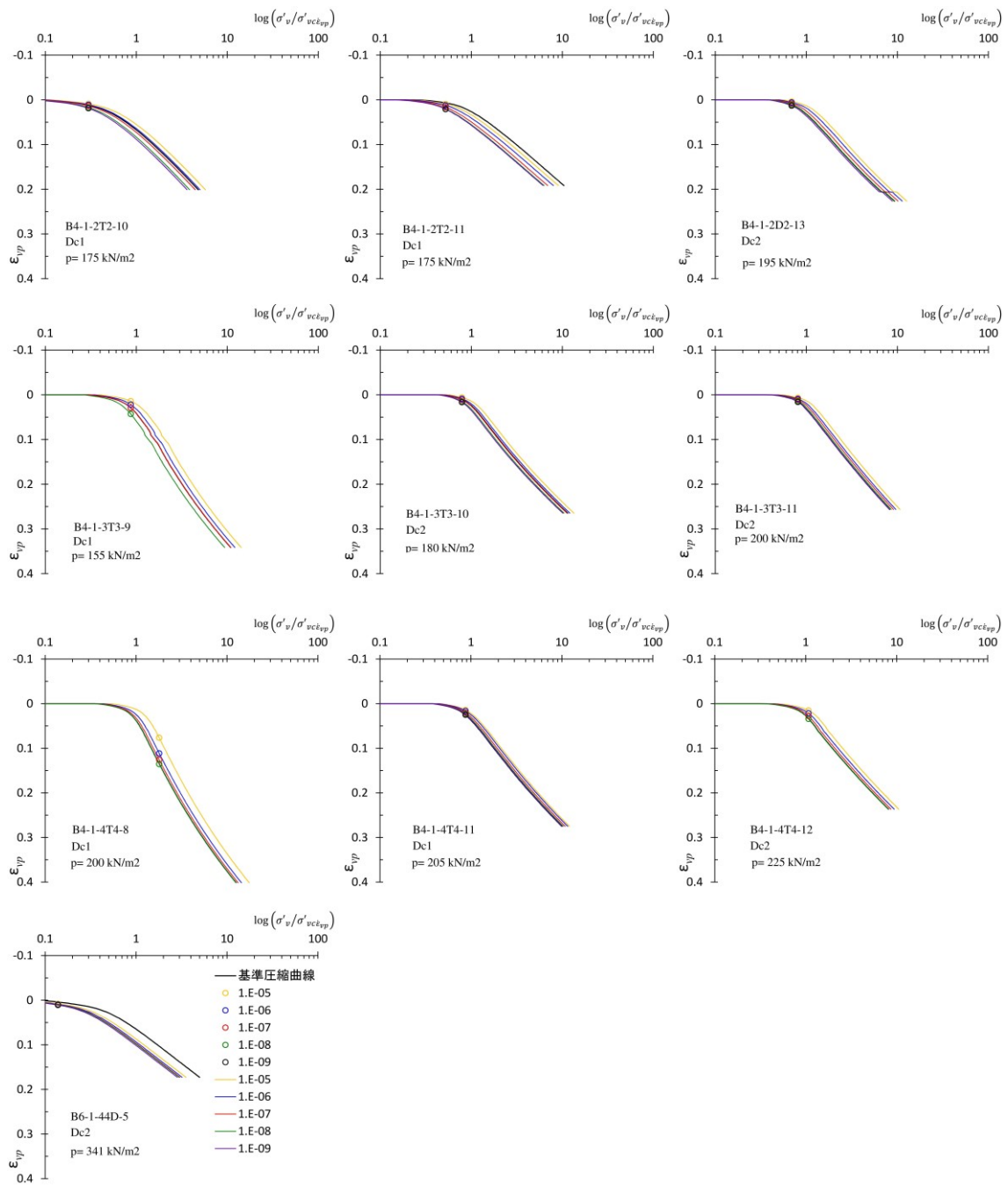


図 6-16 基準圧縮曲線のフィッティング (粘性土) 2/2