

6-3-4 ひずみ速度と圧密降伏応力の関係の整理結果

図 6-17～図 6-19に、図 6-15、図 6-16の基準圧縮曲線のフィッティングにより求めたひずみ速度と圧密降伏応力の関係を示す。各図には、それぞれ式(6-5)におけるパラメータを赤字で示してある。赤色線は、式(6-5)に各パラメータを適用して描いたものである。各々で大きなバラつきが生じている。

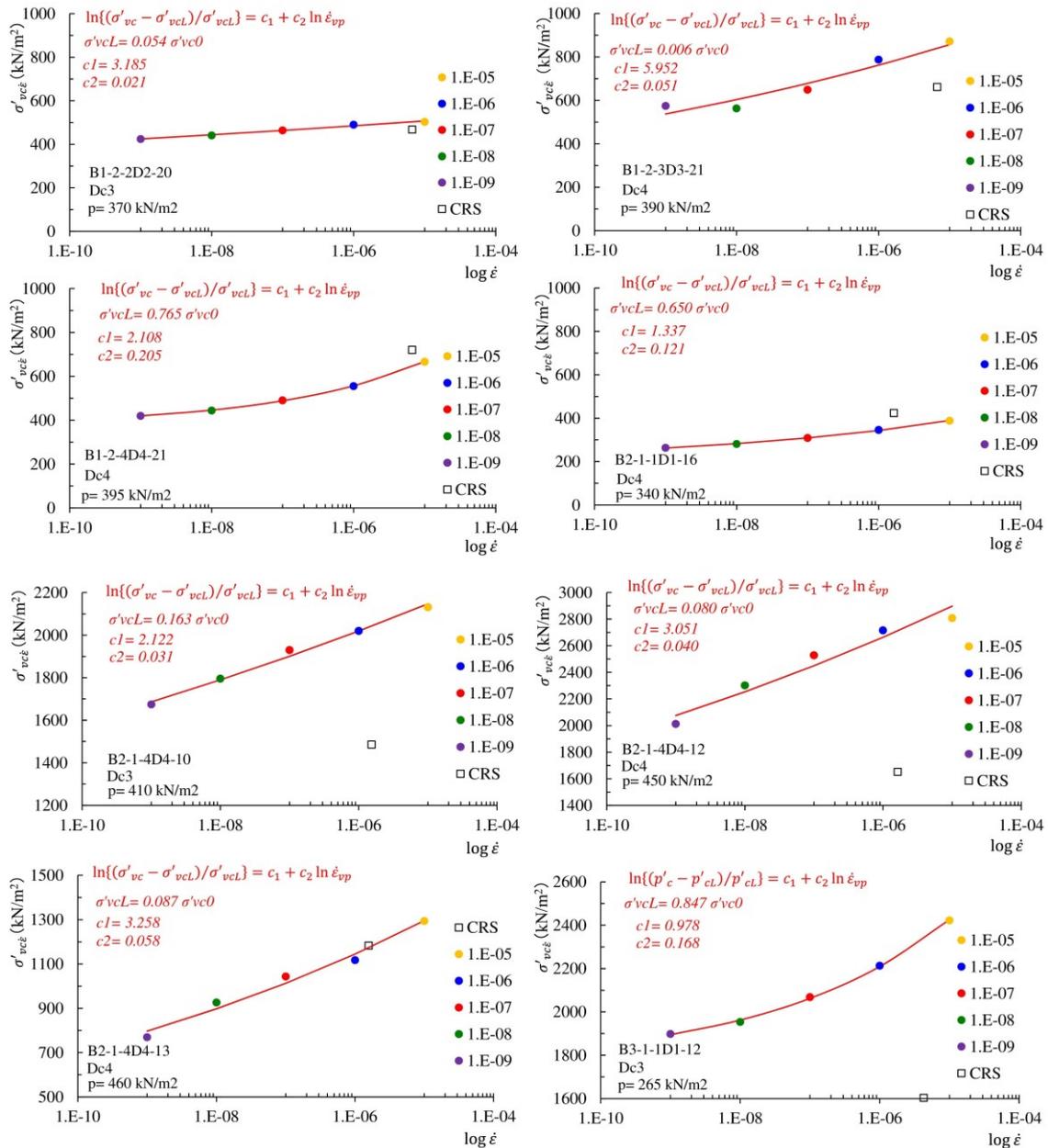


図 6-17 ひずみ速度と圧密降伏の関係 (1/3)

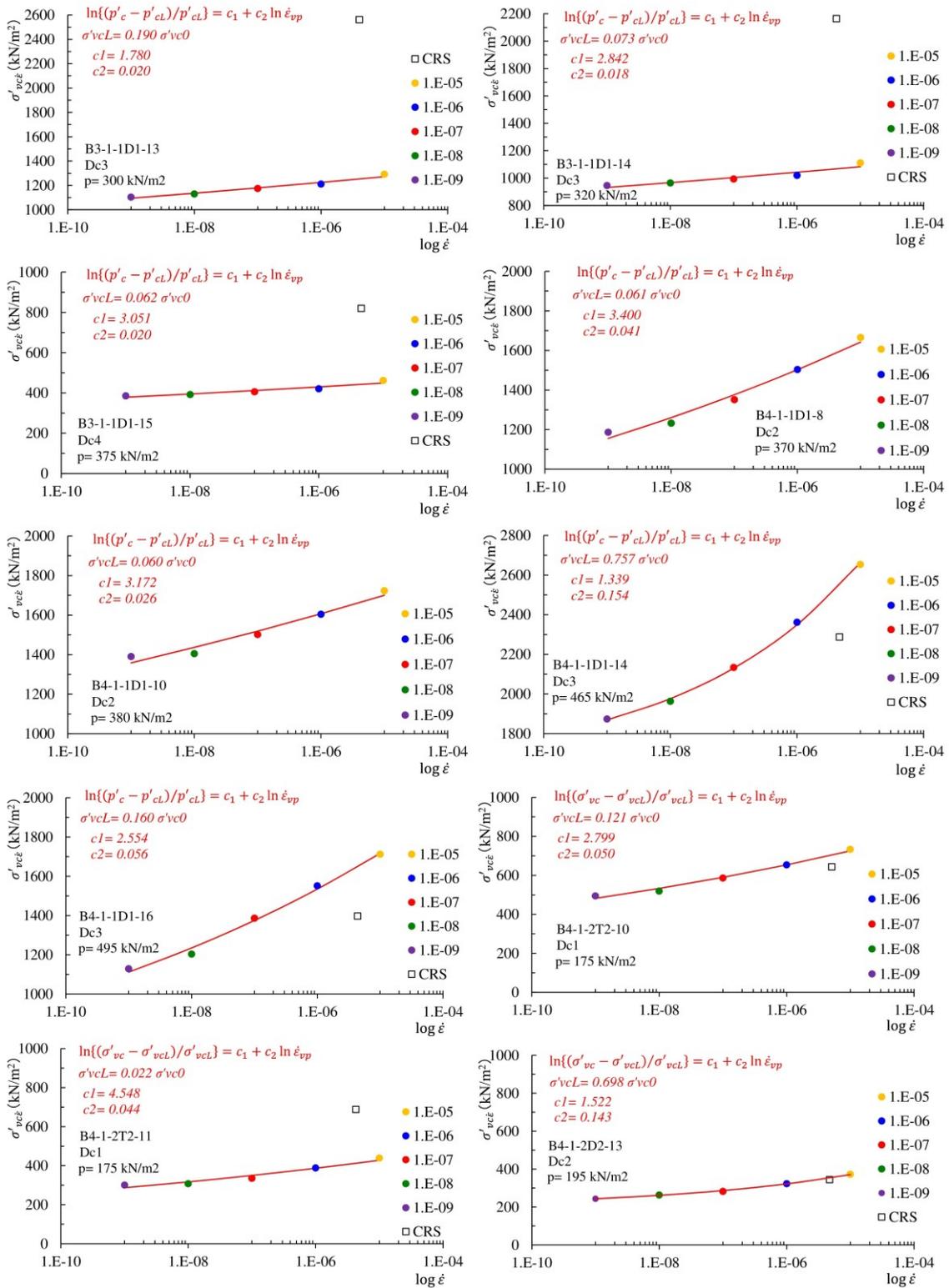


図 6-18 ひずみ速度と圧密降伏の関係 (2/3)

第6章 アイソタック概念の適用性

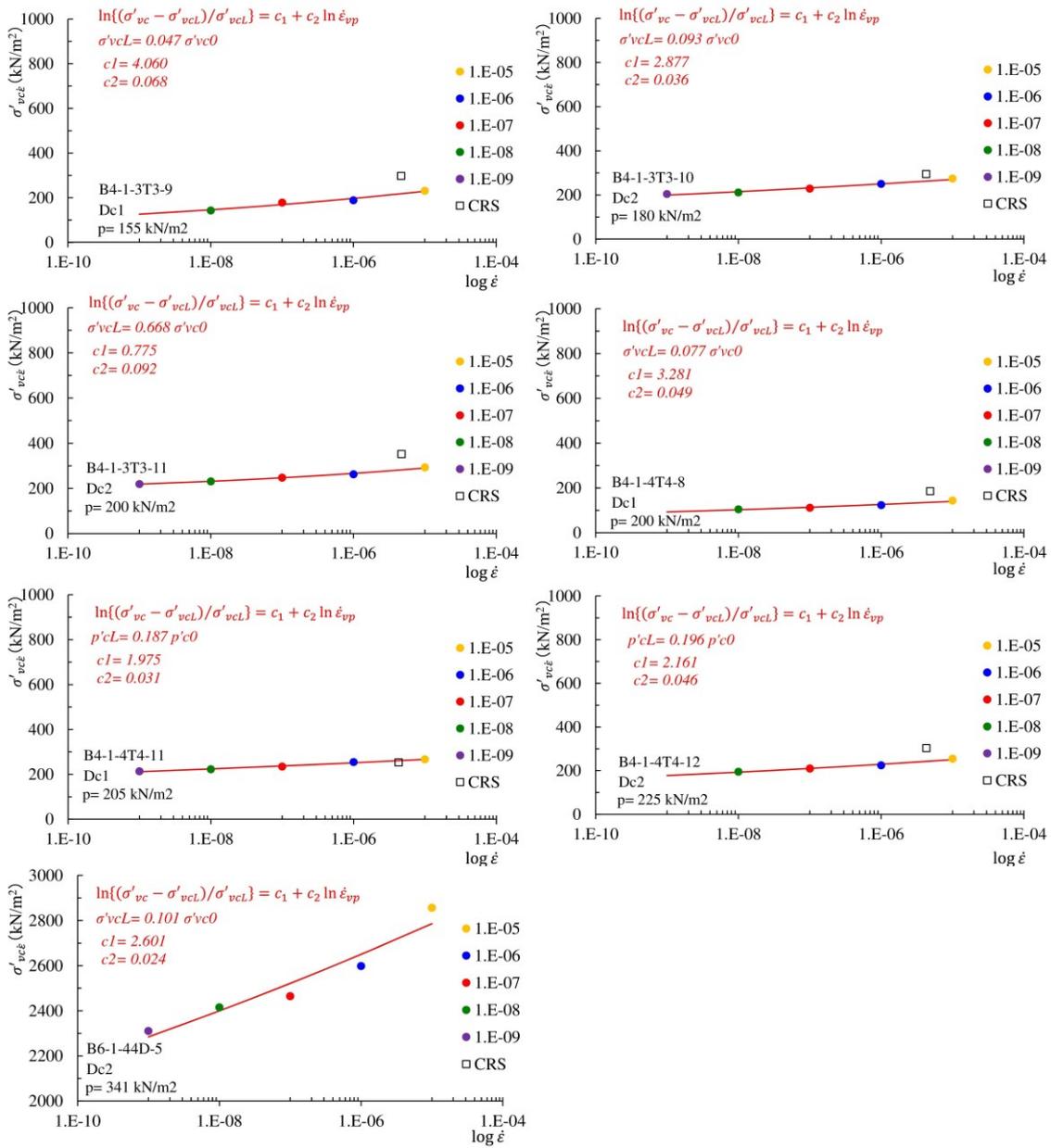


図 6-19 ひずみ速度と圧密降伏の関係 (3/3)

6-3-5 ひずみ速度と正規化圧密降伏応力の関係

図 6-1 7～図 6-1 9 に示した関係式を用いて、各ひずみ速度に応じた圧密降伏応力 σ'_{vc} を求めて求める。 $\dot{\epsilon} = 1 \times 10^{-7}$ (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。図 6-2 0, 図 6-2 1 に更新統粘性土におけるすべての整理結果を示す。図 6-1 7～図 6-1 9 に比べて、縦軸を対数表示にしていることもあり、各々に生じていたバラつきがほとんど目立たなくなっている。

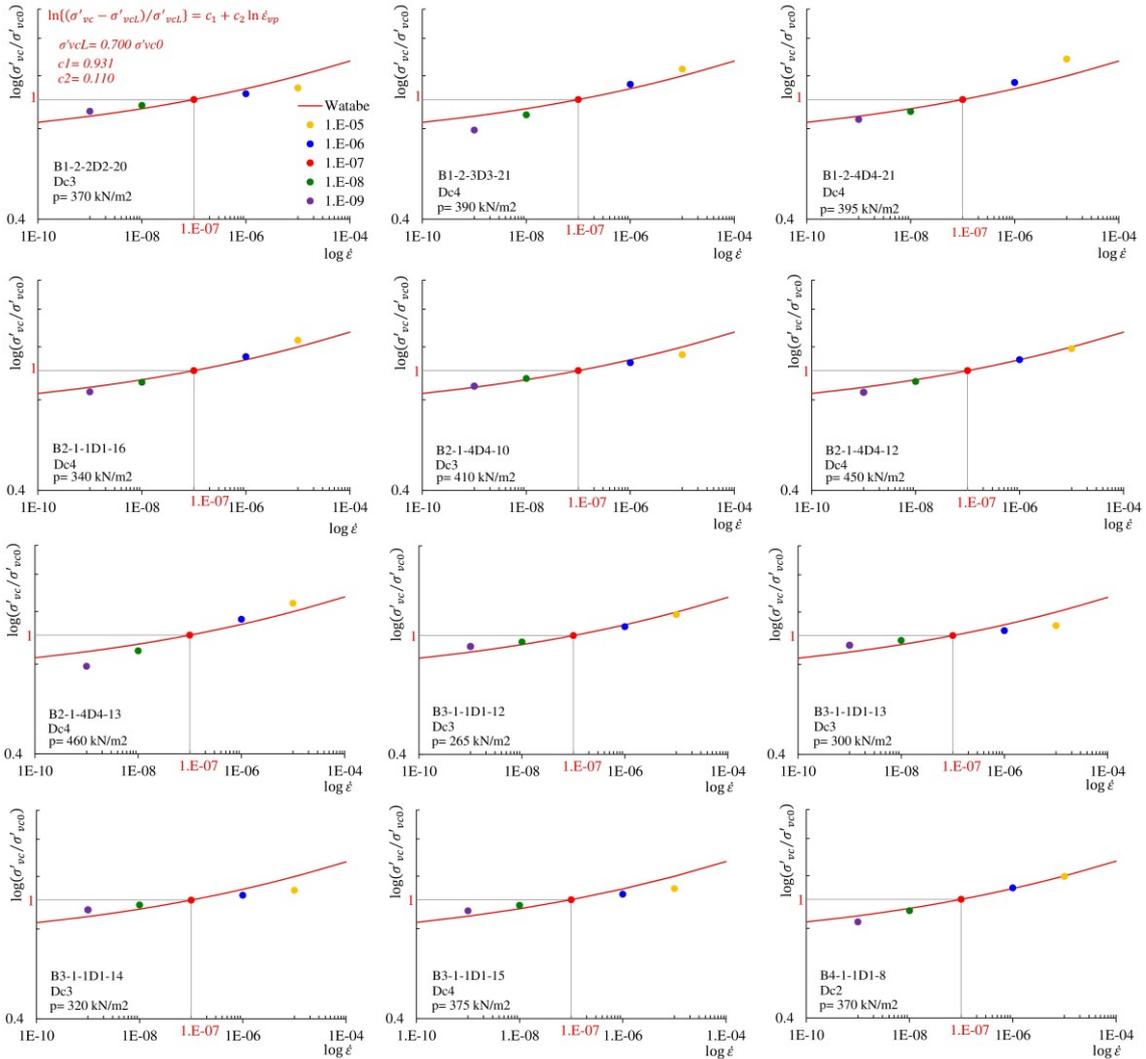


図 6-2 0 ひずみ速度と正規化圧密降伏応力の関係 (1/2)

第6章 アイソタック概念の適用性

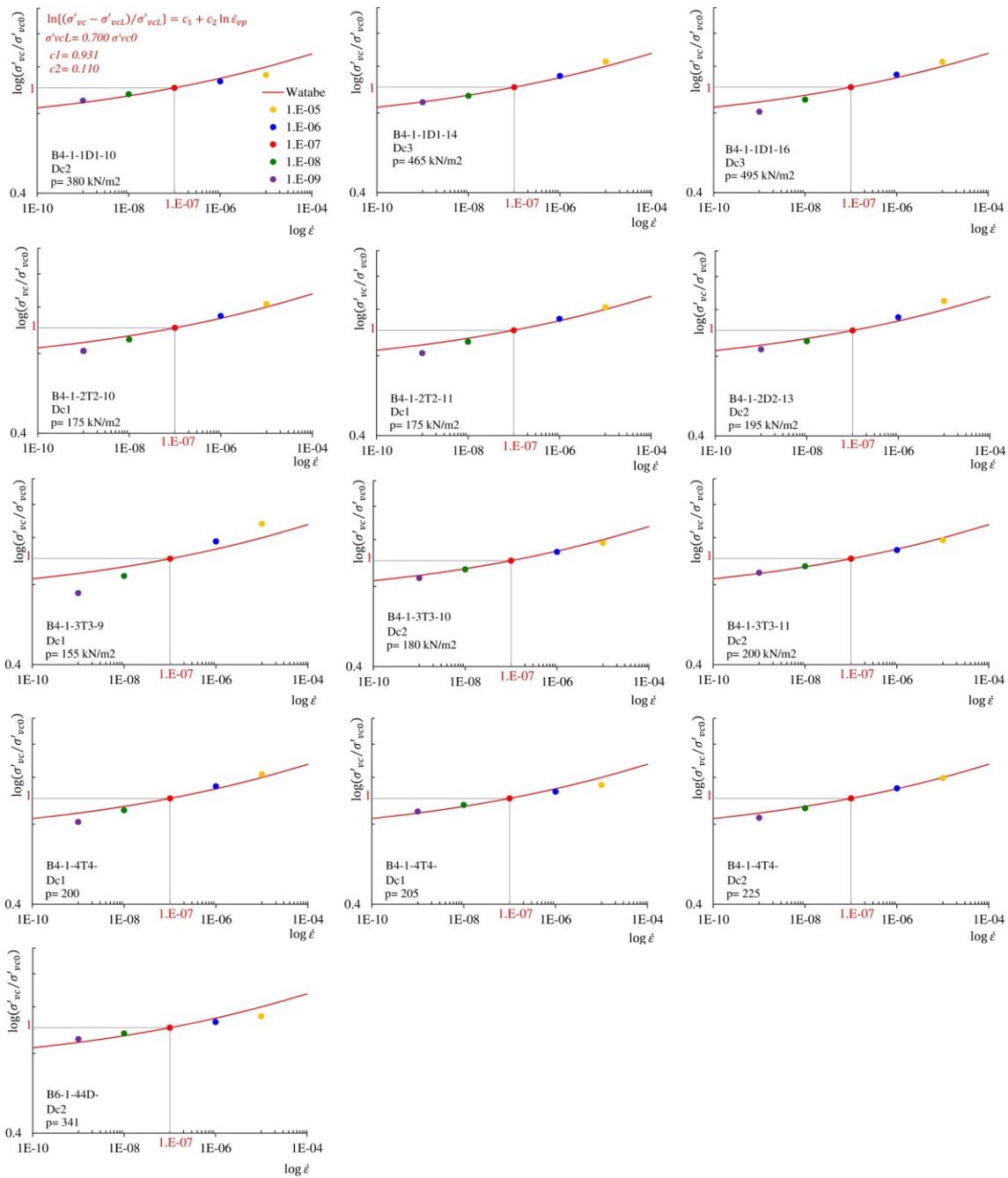


図 6-2 1 ひずみ速度と正規化圧密降伏応力の関係 (2/2)

6-3-6 統合近似曲線

渡部らは、図 6-2 に示した曲線を統合近似曲線と呼び、式(6-5)で、 $\sigma'_{vcL}/\sigma'_{vc0} = 0.7$ 、 $c_1 = 0.935$ 、 $c_2 = 0.107$ としたとき、世界各国の粘土が整合する [13] [14]としている。なお、 σ'_{v0} は、基準圧縮曲線で $\dot{\epsilon} = 1.0 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ に対応した降伏点から求めた圧密降伏応力である。

図 6-2 2 に、白竜湖軟弱地盤の更新統粘性土の長期圧密試験と定ひずみ速度圧密試験の結果について、渡部らの方法でデータを整理した結果と統合近似曲線（図中赤色の実線）の比較を示す。統合近似曲線は、その定義から $(1.0 \times 10^{-7}, 1.0)$ を通るが、渡部らのパラメータではわずかにずれが生じたため、 $c_1 = 0.935$ を $c_1 = 0.931$ へ、 $c_2 = 0.107$ を $c_2 = 0.110$ へと調整している。また、図には、累乗近似曲線*1（青色の実線）も同時に示した。近似曲線として違和感はないように見える。

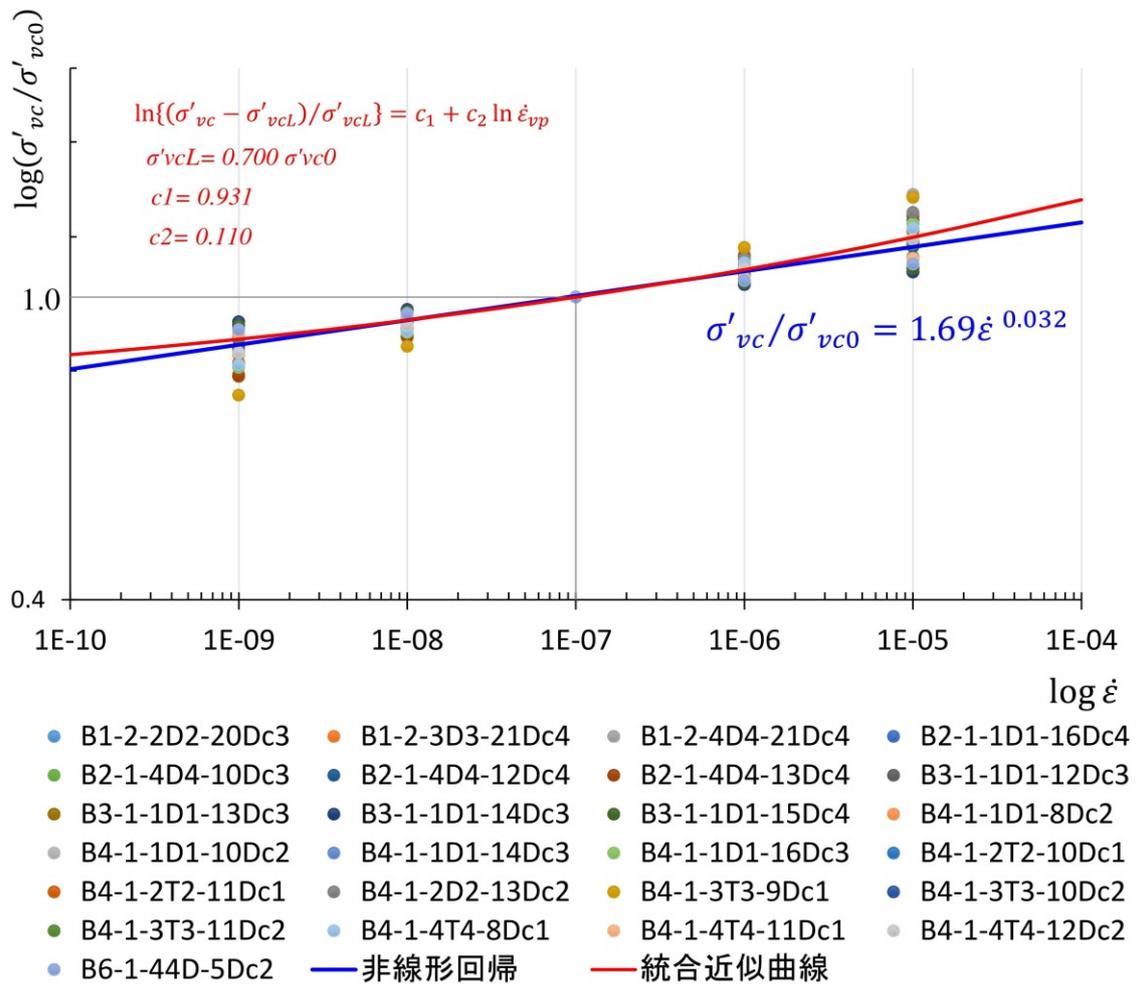


図 6-2 2 統合近似曲線との比較

*1 反復計算による非線形回帰で求めた。

図 6-2 3は、図 6-2 2に示した統合近似曲線との比較に重ねて、渡部らによる世界各地の粘土のデータのプロット [13] [14]の範囲（関西空港一期事業の人工島下における原位置のデータを除く）を青色の破線で大まかに示したものである。白竜湖軟弱地盤の更新統粘性土の長期圧密試験と定ひずみ速度圧密試験のデータを用いて渡部らの方法に準じた整理をした結果は、概ねこの青色の破線の範囲内にある。

白竜湖軟弱地盤の更新統粘性土は、他の粘土と同様に渡部らの統合近似曲線に整合しており、アイソタック概念が適用できるものと考えられる。

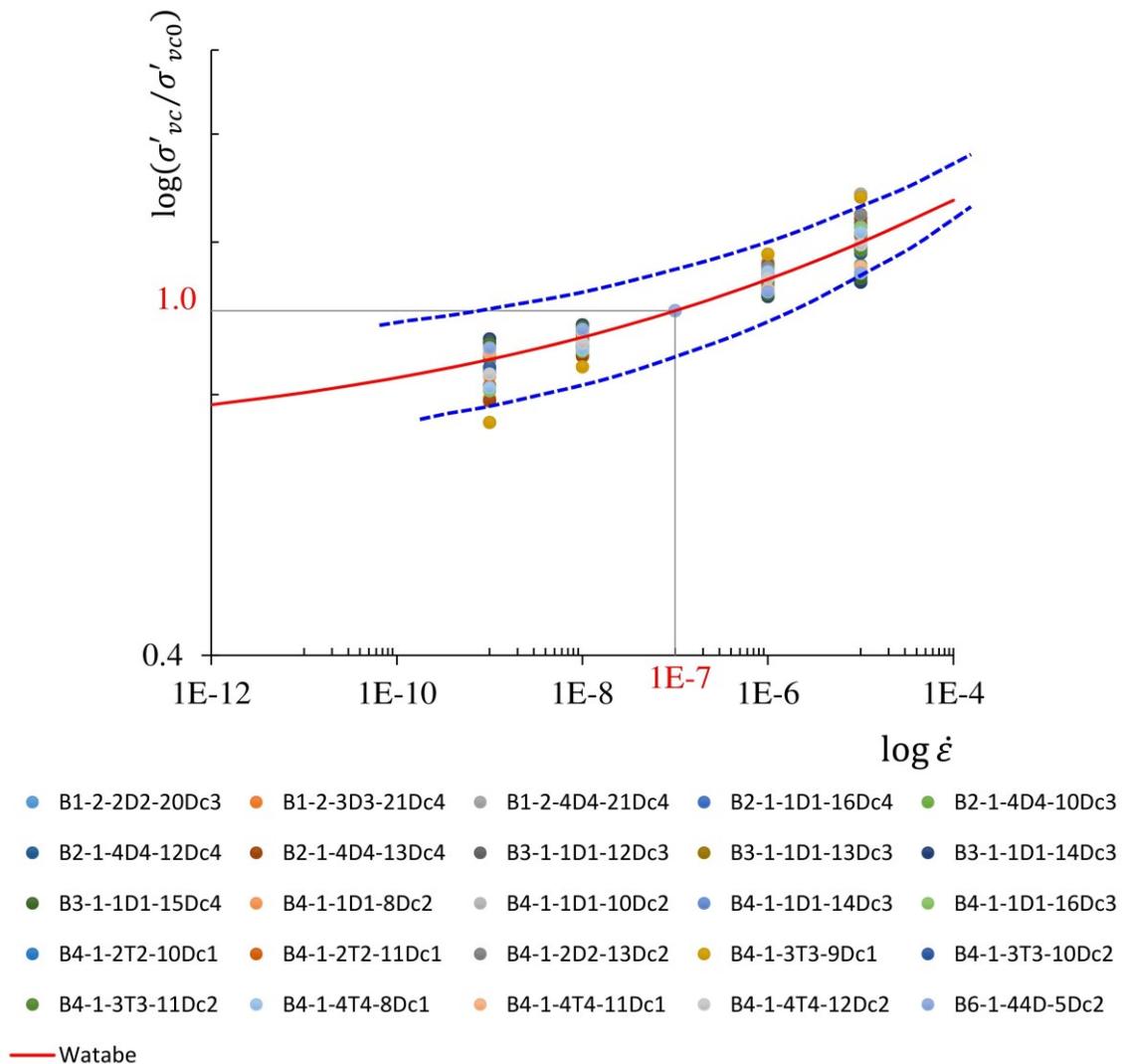


図 6-2 3 世界各地の粘土のプロットの範囲と白竜湖軟弱地盤の粘性土の比較

6-4 本章の結論とその意味

以上に述べたとおり、白竜湖軟弱地盤の更新統粘性土はアイソタック概念を適用でき、式(6-5)で定義される統合近似曲線に適合するものとする(図6-23)。長期圧密試験とひずみ速度圧密試験のデータを整理した結果を個別に見ると、図6-19、図6-20のとおり、それぞれの結果のバラつきが目立つ。これらのバラつきは、特に長期圧密試験の条件が渡部らと異なっており、十分な載荷領域での試験を行っていないことに起因しているものとする。なお、更新統有機質土については、特に長期圧密試験のデータが今回の整理方法に適合しなかった。

渡部らは、統合近似曲線の傾き I_α について^{*2}、式(6-7)のとおり、二次圧密係数 C_α と圧縮指数 C_c の比と一致し、その値はひずみ速度に応じて変化する^{[13] [14]}としている。

$$I_\alpha = \frac{\Delta \log(\sigma'_{vc}/\sigma'_{vc0})}{\Delta \log \dot{\epsilon}} = \frac{\Delta \log \sigma'_{vc}}{\Delta \log \dot{\epsilon}} = \frac{C_\alpha}{C_c}$$

(6-7)

そして、ひずみ速度は経過時間に反比例して減少することを述べている^[13]。つまり、二次圧密係数と圧縮指数の比が時間の経過とともに小さくなることを指摘している。ひずみ速度が十分に小さくなるくらいに時間が経過すれば、 $I_\alpha \approx 0$ となる。もし、圧縮指数が時間経過で変化しないものとするれば、二次圧密係数が時間経過に伴って小さくなることになる。 I_α の逆数は、式(5-43)で弾性領域を無視した場合のべき指数に相当する。つまり、このべき指数が時間経過とともに大きくなることになる。Mesri and Godlewski^[18]は、様々な自然土の C_α/C_c を調べ、その結果を基に Mesri and Castro^[19]は無機な軟弱粘土は $C_\alpha/C_c = 0.04 \pm 0.01$ の範囲にあり、時間によらず一定であるという概念を示している。渡部らは、この $C_\alpha/C_c = 0.04 \pm 0.01$ の範囲は統合近似曲線の傾きで言えばひずみ速度が $1.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1} \sim 1.0 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ の範囲に相当し、室内試験の結果として調和的であるとしている。その一方で、 C_α/C_c が一定という概念については否定していることになる。

白竜湖軟弱地盤の更新統粘性土は、統合近似曲線に十分に適合しそうであるが、そのプロットは図6-22に見るとおり、累乗近似曲線で代表することも十分可能(相関係数は0.9を超える)である。この場合、 I_α は一定になり、Mesri and Castroらの主張を支持することになる。

仮に、二次圧密係数に時間経過に依存した変化がないものだとしたら、どのようなことになるのだろうか。図6-24は、粘性土の標準圧密試験の結果を基に作図したもので、(a)が間隙比と圧密圧力、(b)が間隙比と経過時間の関係である。この供試体の圧縮指数は $C_c = 0.565$ で、二次圧密係数は $C_\alpha = 0.021$ であった。この二次圧密係数が、試験開始1日後から変化しないものとして、以降 10^{12} 日後まで時間が経過した場合を想定している。前章で述べた関口・太田の弾粘塑性構成モデルは、時間経過による二次圧密係数の変化は考慮し

*2 渡部らは統合近似曲線の傾きを α としているが、他の章との混乱を避けるため、 I_α とした。

ていない。このモデルの理論経路は、図 6-2 4 (a) のような平行で等間隔な圧縮曲線を想定していることになる。間隙比と経過時間の関係は直線 (図 6-2 4 (b)) である。

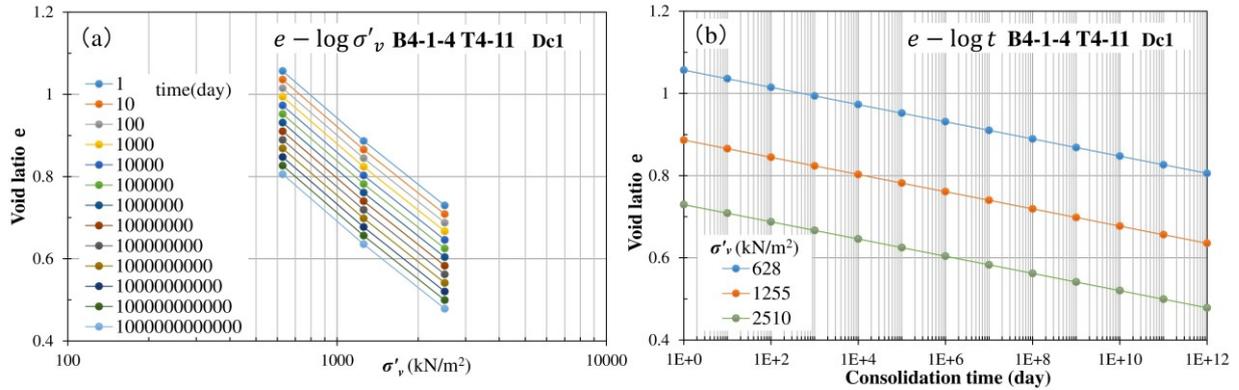


図 6-2 4 二次圧密係数が一定の場合の $e - \log p$ と $e - \log t$

次に、二次圧密係数が時間とともに減少する場合を想定してみる。ここでは、簡単のため 10 倍の時間経過ごとに 10%の割合で二次圧密係数が低下する状態を仮定してみる。この場合、図 6-2 5 のとおり、間隙比と経過時間の関係は緩やかな曲線を描き、圧縮曲線の間隔は徐々に狭くなる。

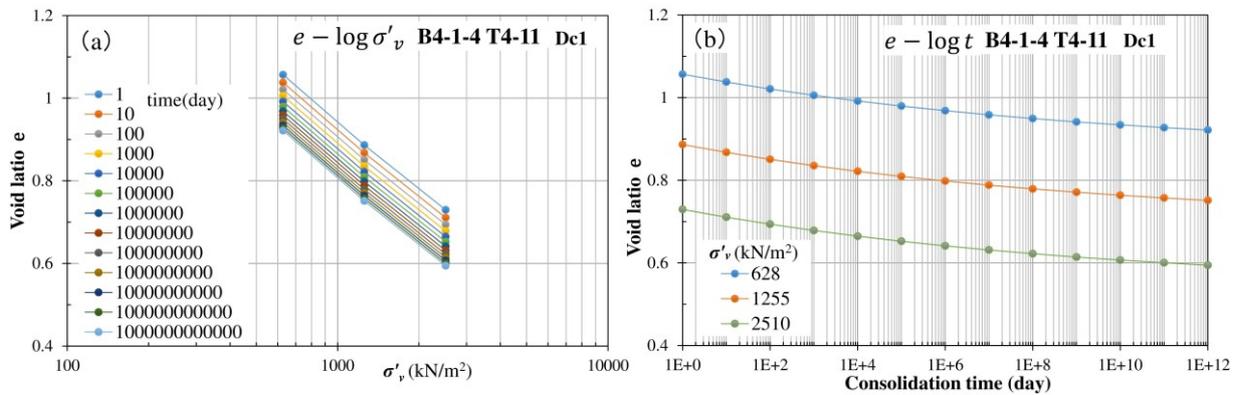


図 6-2 5 二次圧密係数が低下する場合の $e - \log p$ と $e - \log t$

二次圧密係数が時間経過に伴い変化することは、網干らが直径3m厚さ1mの供試体による実験^[21]の結果として報告した例^[22]、^[23]がある。図6-26に、網干らの文献^[22]、^[23]からグラフを読み取り、ひずみと経過時間の関係を再現した。網干らは、圧密試験における寸法効果の確認に主眼を置いているため、図6-26には各種寸法(No.1~No.5)の実験結果が併記されている。表6-1に供試体の寸法等を示した。No.5が直径3m厚さ1mの供試体に当たる。この供試体のみ約10年間の試験に供されている。図6-27に、供試体No.5の最終値付近を拡大した。網干らは、この部分のプロットを縦横同じ比率でさらに拡大して示している。この拡大されたプロットを読み取り、図6-28に再現した。図6-26の最終値付近は、この拡大図を基にプロットしている。

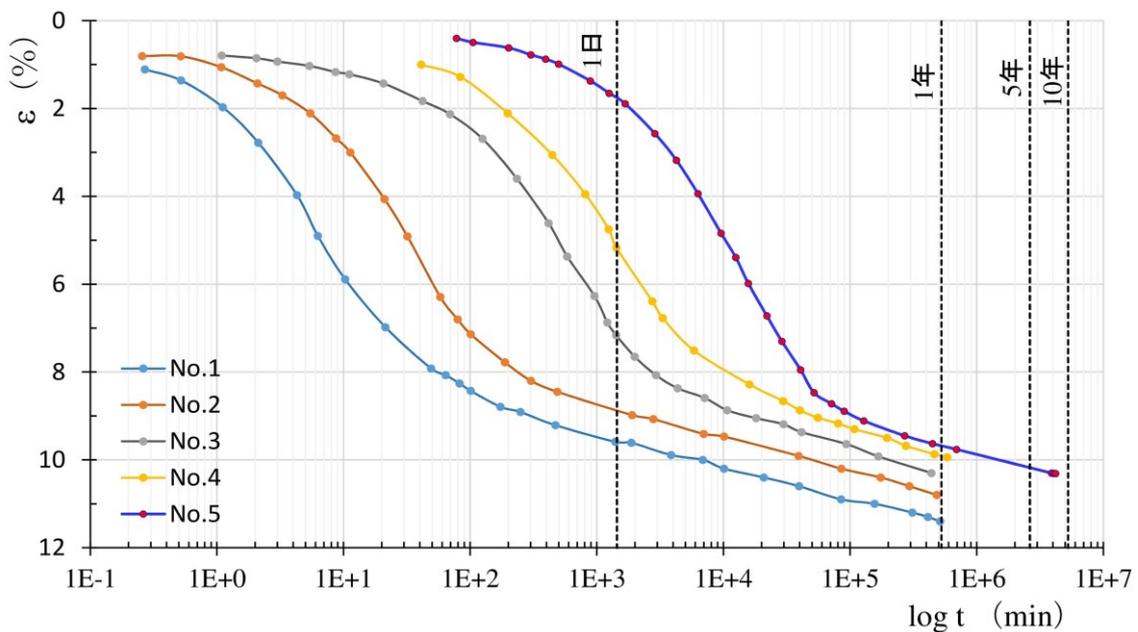


図 6-26 圧密試験の寸法効果の確認実験におけるひずみと経過時間の関係^[21]、^[22]、^[23]

表 6-1 各供試体の寸法等^[21]

No.	1	2	3	4	5
D mm	60	144	600	1200	3000
H mm	20	48	200	400	1000
Load	Loading Lever		Hydraulic Pressure		Direct Loading
Place	Laboratory			In-situ	

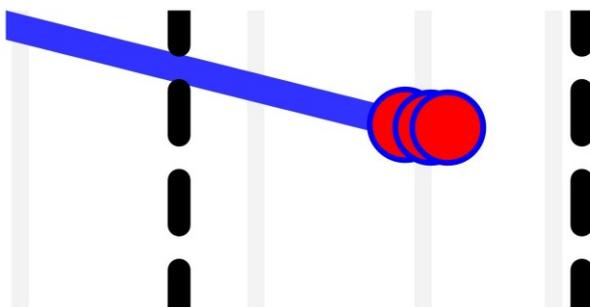


図 6-27 供試体 No. 5 の最終値付近の拡大

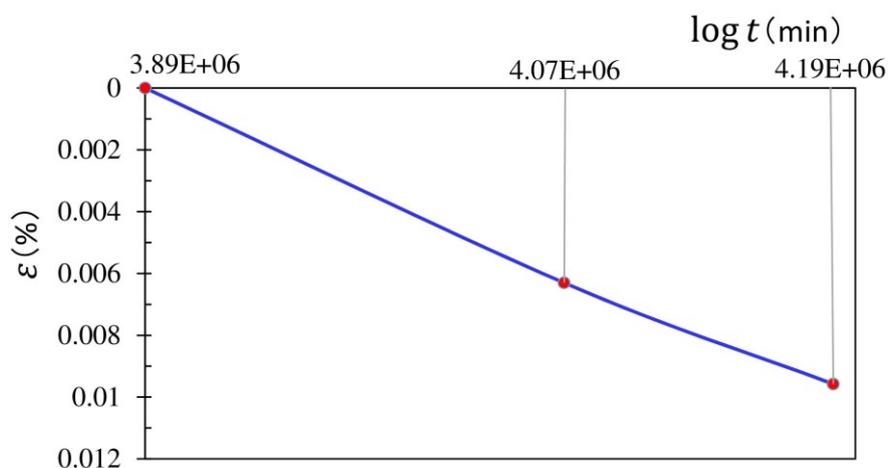


図 6-28 網干らによる No. 5 の最終値付近の拡大図の再現 [22], [23]

図 6-26 の No.1~No.5 の ε - $\log t$ 曲線は、二次圧密過程でほぼ平行に見えるが、No.5 の最終値付近を拡大した図 6-27 を見ると、明らかに勾配が緩く変化している。

ここで、図 6-29 は、図 6-26 について、ひずみ速度と経過時間の関係に整理しなおしたものである。この図でも、供試体 No.5 の最終値付近でひずみ速度が急激に低下していることが分かる。網干らは、図 6-28 の供試体 No.5 の最終値付近の勾配が $C_{\alpha\varepsilon} = 0.29\%$ で、他の供試体と平行な範囲の平均勾配 $C_{\alpha\varepsilon} = 0.95\%$ に比べて明らかに低下した [22] としている。

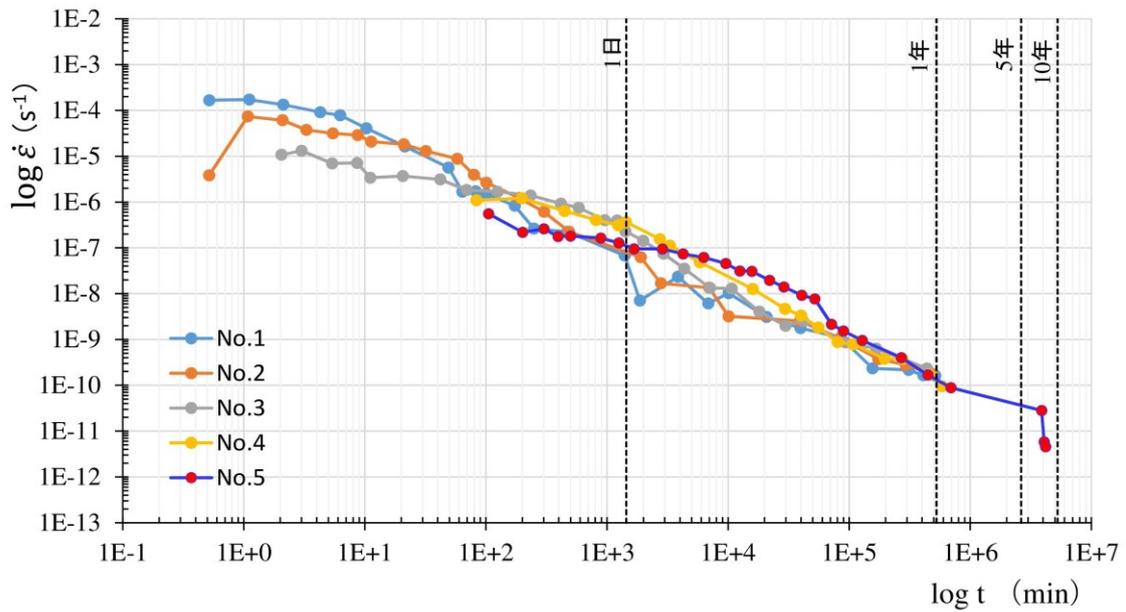


図 6-29 ひずみ速度と経過時間の関係

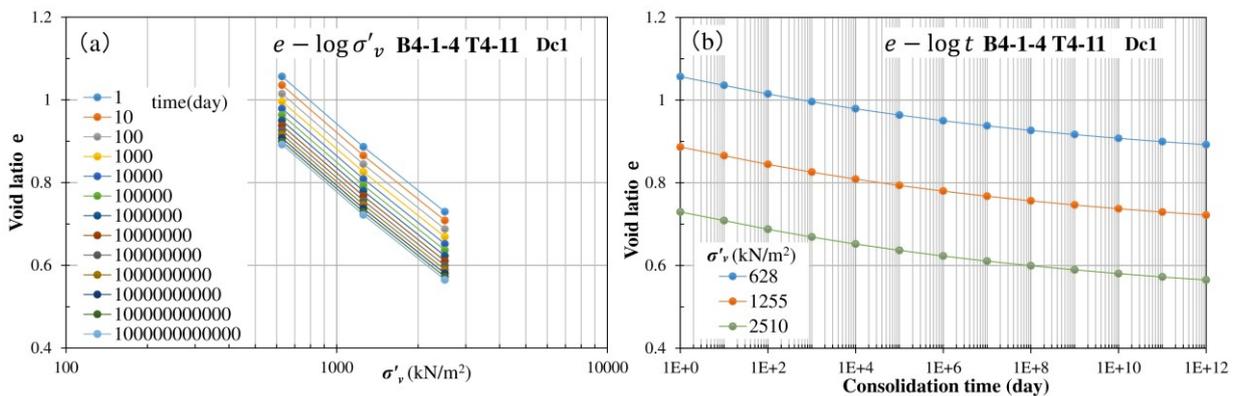


図 6-30 二次圧密係数が一定期間経過後から低下する場合の $e - \log p$ と $e - \log t$

図 6-30 は、網干らの実験結果に倣い、一定期間経過後に二次圧密係数の低下が始まるものとして試算したうえ、作図したものである。ここでは、試験開始から3年後以降、時間の経過が10倍になるときに10%ずつ二次圧密係数が低下するものと仮定した。縦軸のスケールにもよるが、図 6-30 (a) では、二次圧密係数の低下が始まる3年後以降の圧縮曲線の間隔が徐々に狭くなっている。網干らの実験結果では、実験開始から10年以内に二次圧密係数が1/3に低下しており、図 6-30の想定より二次圧密係数の低下が急激であるが、この傾向が継続するとなると、さらに圧縮曲線の間隔が狭まり、重なって見えるようになるはずである。

第6章 アイソタック概念の適用性

二次圧密係数は、層厚や温度などの影響を受けず一定である [24]とされるが、網干らは、その状態が続くと最終沈下量が無限大となることを指摘 [22]している。ここで、もう一度、図 6-2 4 (a) を見ると、圧縮曲線は 10^{12} 日まで描かれている。 10^{12} 日は、約 27 億年に相当するが、二次圧密係数が一定であったとしても、図 6-2 4 (a) の例の場合は特に不自然さは感じられない。

次に、図 6-3 1 (a) は、式 (6-7) を図示したもので、(b) はその低下割合 (ϵ が 1/10 になる毎に、変化前後の傾きの大きさの比を求めたもの。) を示したものである。今、渡部らに倣い [13]、10 倍の時間経過に対して ϵ が 1/10 になるものとして、図 6-3 1 (b) の関係 (C_c は変化しないものとする) を用いて圧縮曲線群を改めて描画すると、図 6-3 2 のとおりとなる。圧縮曲線の間隔は、図 6-2 5 や図 6-3 0 より急激に狭くなっている。

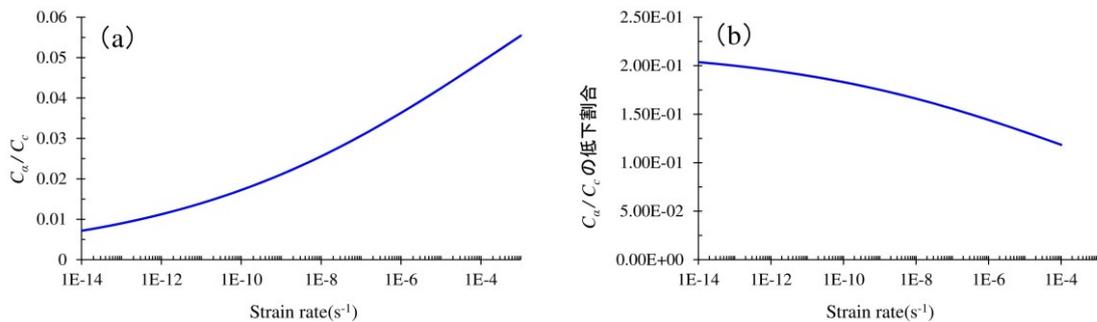


図 6-3 1 統合近似曲線の傾きの変化

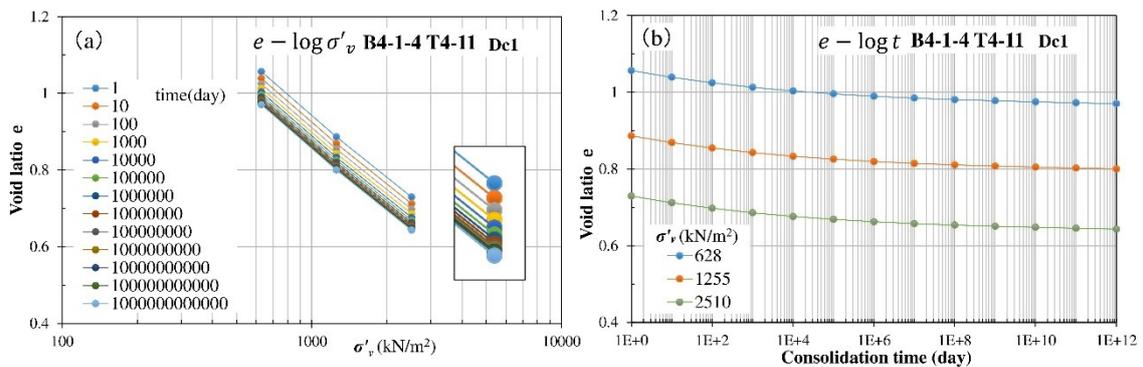


図 6-3 2 二次圧密係数が統合近似曲線の傾きにに合わせて低下する場合の $e - \log p$ と $e - \log t$

以上のとおり、白竜湖軟弱地盤の更新統粘性土はアイソタック概念に概ね適合することを示せたものの、二次圧密係数が経過時間とともに低下するという点については、自らの明確な見解を示すことができない。関口・太田の構成モデルでは、二次圧密係数は時間経過によらず一定であるものとしている。高速道路の供用から20年後の沈下量の予測は、「二次圧密係数が一定である」と仮定した結果である。「二次圧密係数が時間経過とともに低下する」と考えるより、やや安全側の予測結果となっているはずである。

第5章で論じた t_i を求めるという行為は、例えば図6-24(a)で曲線を1本特定するのと同様である。ところが、図6-25や図6-30、さらには、図6-32では様相が異なってくる。図6-32には、圧縮曲線の部分的な拡大図を併せて示してある。この例の場合、時間の経過と共に圧縮曲線がほとんど重なるような状態になっている。この中から1本の曲線を特定するのは相当に困難であろう。 t_i を求めるためには、この拡大図で、例えば、 10^5 日（約3百年）と 10^7 日（約3万年）の曲線を区別して特定する必要がある。

実際の地盤における二次圧密係数はどのような傾向を示すのだろうか。網干らの実験例を除き、10年のも長期間に渡り二次圧密係数の時間変化を捉えた例は確認できない。次章では、白竜湖軟弱地盤の試験盛土の挙動から、原位置の二次圧密係数を求めてみる。

《参考文献》

- [1] H. Sekiguchi and H. Ohta, "Induced anisotropy and time dependency in clays," *Proceeding of Specialty Session 9,9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp. 229-238, 1977.
- [2] 東日本高速道路株式会社, "設計要領第一集 土工編," p. 5_63, 2015.
- [3] L. Bjerrum, "Engineering geology of Norwegian normally-consolidated marine clays as related to settlements of buildings," *7th Rankin Lecture, Geotechnique*, vol. 17, no. 2, pp. 81-118, 1967.
- [4] L. Bjerrum, "Embankments on soft ground," *Proc. of the Specialty Conference on Performance of Earth and Earth Supported Structures*, vol. 2, pp. 1-54, 1972.
- [5] L. Bjerrum, "Problems of Soil Mechanics and Constructions n Soft Clays," *Proc. of 8th the Eighth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, vol. Session 4, pp. 111-159, 1973.
- [6] L. Šuklje, "The Analysis of the Consolidation Process by the Isotach Method," *Proc. 4th Int. Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, vol. 1, pp. 200-206, 1957.
- [7] 田中洋行, 林宏親, "泥炭地盤に対するアイソタック則の適用性," *地盤工学ジャーナル*, vol. 9, no. 2, pp. 275-286, 2014.
- [8] C. B. Crawford, "Interpretion of the Consolidation Test," *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, vol. 90, no. 5, pp. 87-102, 1964.
- [9] G. Imai, "A Unified Theory of One-dimensional Consolidation with Creep," *Proceedings of the 12th Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, vol. 1, pp. 57-60, 13-18 August 1989.
- [10] 社団法人 地盤工学会, "地盤材料試験の方法と解説," pp. 500-522, 2010.
- [11] 渡部要一, 田中政典, 佐々真志, 森川嘉之, "関西国際空港海底粘土の長期圧密挙動に関するアイソタックモデルによる評価," *港湾空港技術研究所報告*, vol. 48, no. 2, pp. 63-81, 2009.
- [12] Y. Watabe, K. Udaka, Y. Nakatani and S. Leroueil, "Long-term Consolidation Behavior Interpreted with Isotache Concept for Worldwide Clays," *Soils and Foundations*, vol. 52, no. 3, pp. 449-464, 2012.
- [13] 渡部要一, 金子崇, "アイソタック概念を用いてモデル化した世界各地の粘土の長期圧密挙動," *港湾空港技術研究所報告*, vol. 54, no. 1, pp. 3-30, 2015.
- [14] Y. Watabe and S. Leroueil, "Modeling and Implementation of the Isotache Concept for Long-Term Consolidation Behavior," *International Journal of Geomechanics*, vol. 15, no. 5, 2015.

- [15] 宇高薫, "セメンテーションにより高位化した構造と顕著なクリープ特性を有する粘土の圧縮・圧密特性に関する研究".
- [16] S. Leroueil, M. Kabbaj, F. Tavenas and R. Bouchard, "Stress-strain-strain Rate Relation for the Compressibility of Sensitive Natural Clays," *Géotechnique*, vol. 35, no. 2, pp. 159-180, 1985.
- [17] Y. Watabe, K. Udaka and Y. Morikawa, "Strain Rate Effect on Long-term Consolidation of Osaka Bay Clay," *Soils and Foundations*, vol. 48, no. 4, pp. 495-509, 2008.
- [18] 社団法人 地盤工学会, "地盤材料試験の方法と解説," pp. 462-499, 2010.
- [19] G. Mesri and P. M. Godlewski, "Time and Stress-Compressibility Interrelationship," *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, vol. 103, no. 5, pp. 417-430, 1977.
- [20] G. Mesri and A. Castro, "Ca/Cc Concept and K₀ During Secondary Compression," *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, vol. 113, no. 3, pp. 230-247, 1987.
- [21] H. Aboshi, "An Experimental Investigation on the Similitude in the Consolidation of a Soft Clay Including the Secondary Creep Settlement," *Proceedings of the 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, no. 4, p. 88, 1973.
- [22] 網干寿夫, 松田博, "粘土の二次圧密と沈下解析," *土と基礎*, vol. 29, no. 3, pp. 19-24, 1981.
- [23] 網干寿夫, "軟弱地盤の圧密沈下と地盤改良," *土と基礎*, vol. 38, no. 10, pp. 7-14, 1990.
- [24] G. Mesri, "Coefficient of Secondary Compression," *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS*, vol. 99, no. 1, pp. 123-137, 1973.