

## 7-2-3 ひずみ速度と二次圧密係数の関係

第6章で述べたアイソタック概念における統合近似曲線<sup>[5]・[6]</sup>の傾きは、二次圧密係数と圧縮指数の比を表すとされる。そして、その値は、ひずみ速度に応じて変化<sup>\*1</sup>する。では、試験施工完了後の各試験エリアの挙動はどの程度のひずみ速度を有しているのだろうか。

図7-28は、7-1-3で示したデータ整理の手順において、(1)-2の回帰式を用いた整理を行わずに図7-24～図7-26と同様の整理をしたものである。深層型沈下計の測定値は、増減を繰り返しながら推移していく。上位と下位の沈下計の測定値の差を層厚の変化として整理する場合も、測定値の増減の影響を受ける。二次圧密係数は、図7-28の各曲線の傾きとなるが、この状態では二次圧密係数を求めるのが困難である。このため、沈下計の変位を回帰式で近似したうえで、層厚の変化を求めて工学ひずみに換算し、図7-18～図7-23のとおり作図して、各曲線の傾きを求めるという方法を使った。曲線の傾きは、深層型沈下計の測定値の経時変化の傾向であると考えれば、概ねの傾向を捉えるうえでは十分な方法であるものとする。一方で、図7-18～図7-23の曲線に示されるひずみの経時変化からひずみ速度を求めようとすると、回帰式が持つ特徴がそのまま結果に表れてしまう。

よって、ここでは、回帰式を用いずに深層型沈下計の測定値の整理した結果により、各々ひずみ速度を求めてみる。ただし、図7-28に示したとおり、各データに大きなバラつきが生じているため、概ね1ヶ月ごとにひずみの変化量を求め、その間の経過時間で除してひずみ速度を求めるものとした。

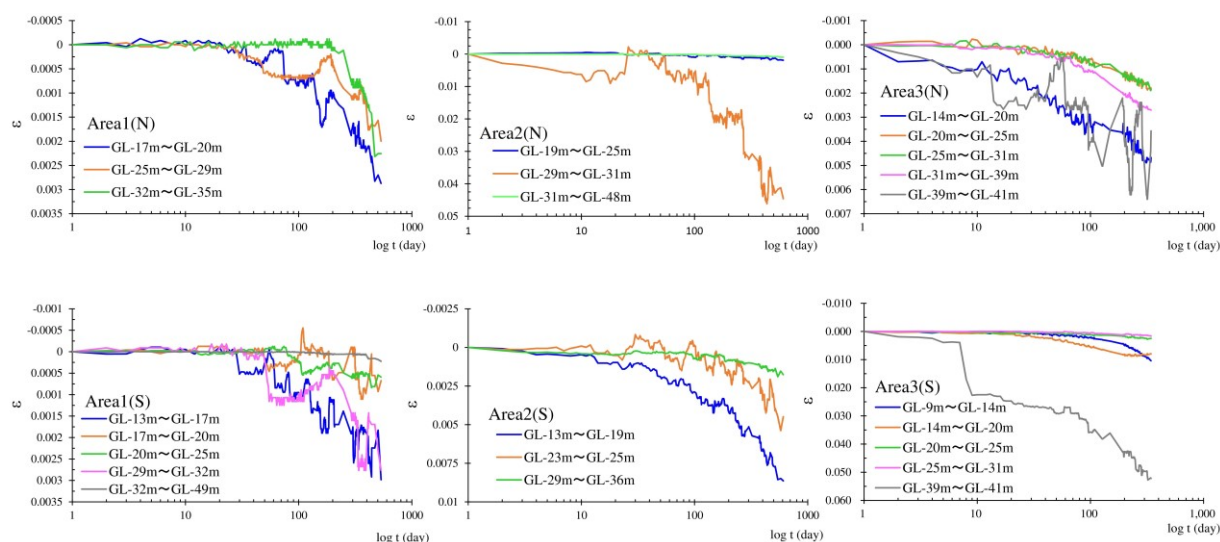


図 7-28 ひずみの経時変化（深層型沈下計の測定値の整理に回帰式を用いない場合）

\*1 ひずみ速度が低下すれば圧縮指数も減少すると考えるが、第6章に示した $I_a$ では圧縮指数が分母に相当するため、分子に相当する二次圧密係数の現象の度合いがより大きいことになる。

図 7-29～図 7-31に、各試験エリアの施工完了後の挙動について、概ね1ヶ月毎の深層型沈下計の測定結果を用いてひずみ速度を求めた結果を示す。各図は、縦軸（対数目盛）をひずみ速度 ( $s^{-1}$ ) とし、横軸を施工完了後の経過日数としている。縦軸が対数表示のため、ひずみ速度が負の場合（測定値上は層厚が増加したことになる）は表示されていない。図の黒色の破線は表示されている範囲における平均値である。また、図 7-18～図 7-23におけるひずみの経時変化を用いてひずみ速度を求めた結果（黒色の実線）も併せて示した。

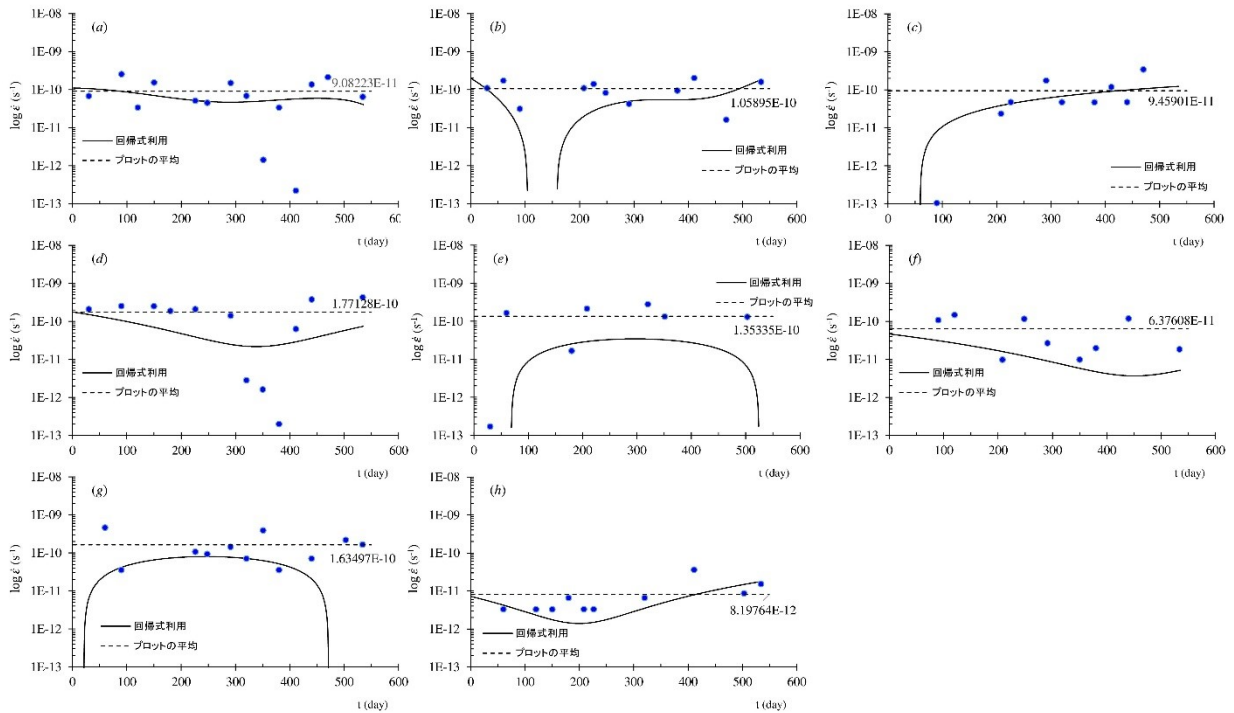


図 7-29 ひずみ速度の経時変化 (Area1)

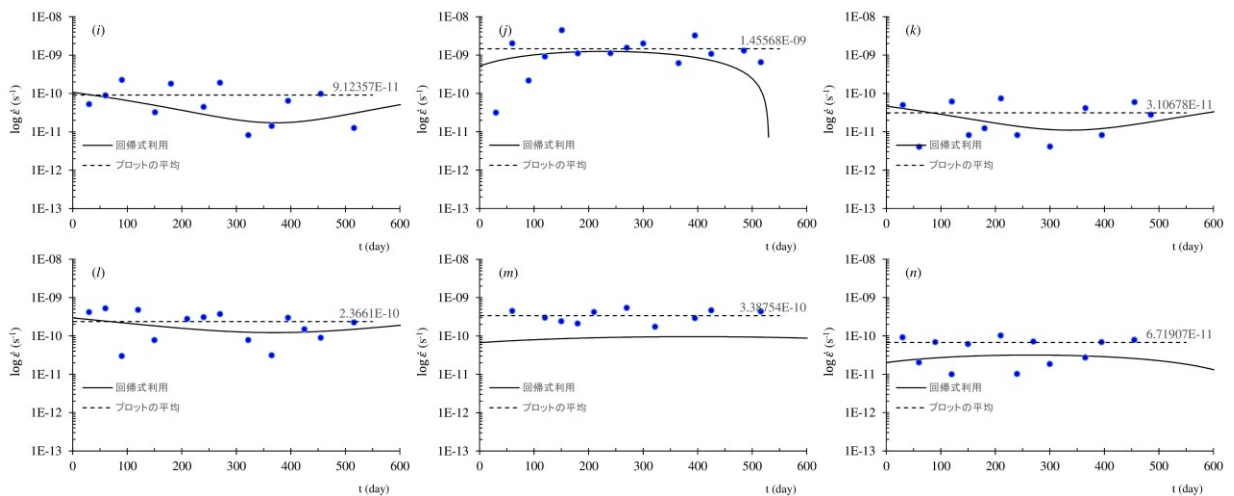


図 7-30 ひずみ速度の経時変化 (Area2)

## 第7章 施工完了後の試験盛土の挙動

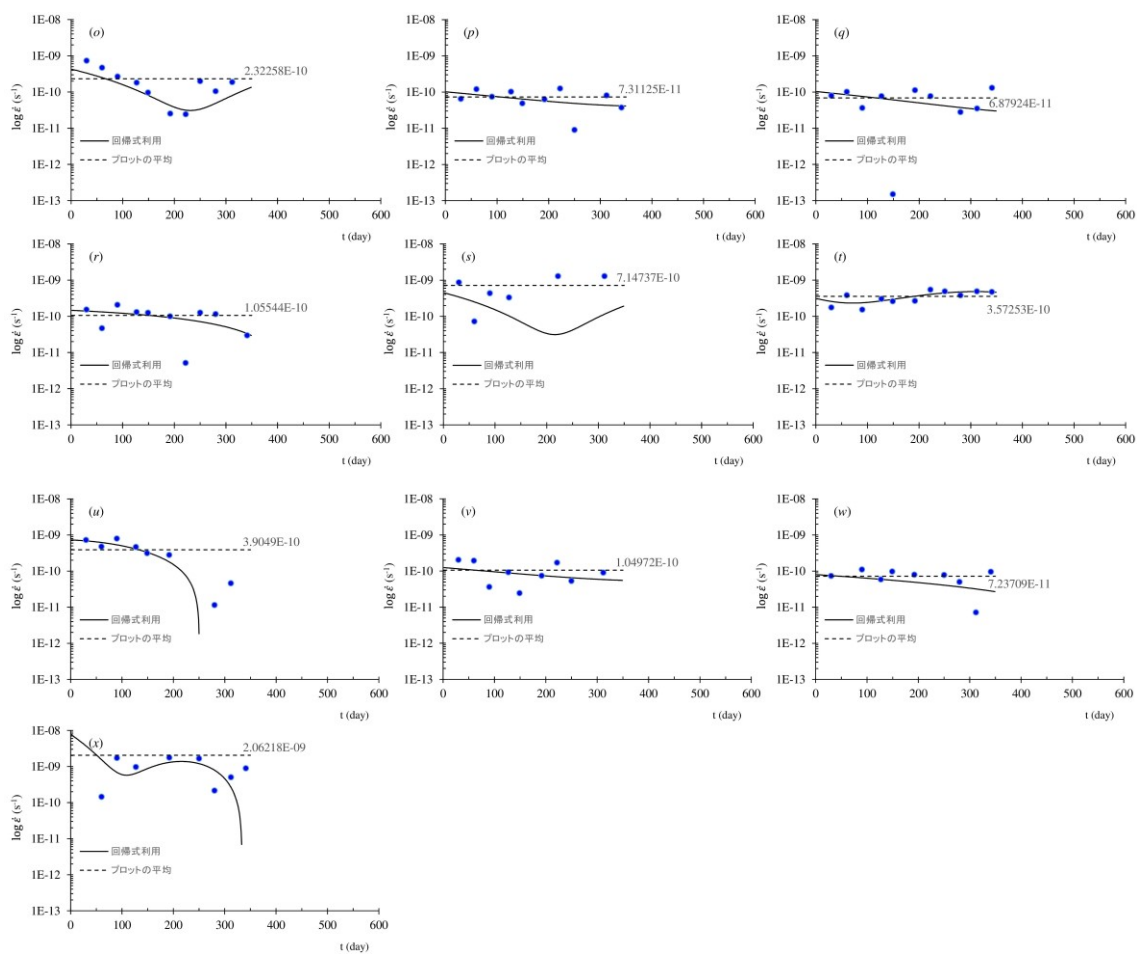


図 7-31 ひずみ速度の経時変化 (Area3)

今回の観測期間内では、ひずみ速度は $1 \times 10^{-10} \sim 1 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$ 程度ではほぼ一定な場合が多かった。また、回帰式を用いてひずみの経時変化を整理したうえでひずみ速度を求めた場合は、上位の沈下計の測定値の回帰式と下位の沈下計の測定値の回帰式との差の変化の程度を求めることになるため、回帰式自体の傾向の影響を受けて不自然な形状となる場合が複数あった。

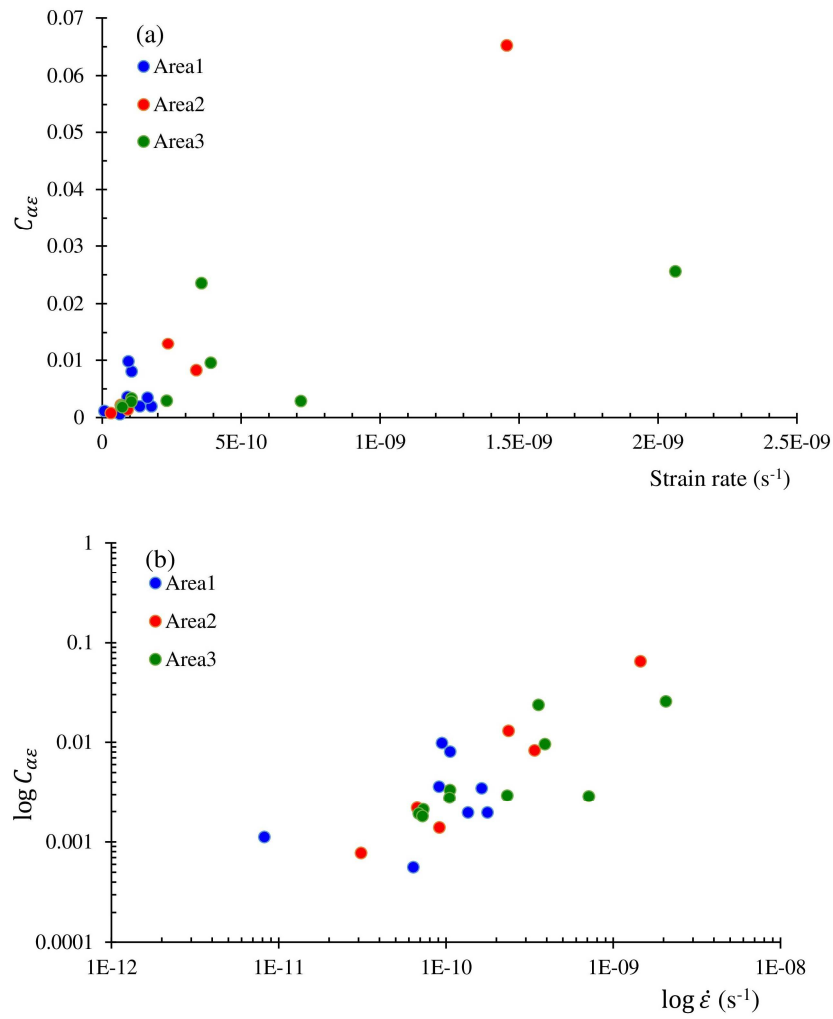


図 7-3 2 二次圧密係数とひずみ速度の関係

図 7-3 1 に示したひずみ速度の平均値と、二次圧密係数の関係を図 7-3 2 に整理した。図 7-3 2 では、下図 (b) で上図 (a) の両軸を対数表示としている。図 (b) では、両者に相関を認める。ひずみ速度  $\dot{\epsilon}$  と二次圧密係数  $C_{\alpha\epsilon}$  は、それぞれ下式で表される。両者は本質的に同じもので、何れか片方が低下すればもう片方も低下する。

$$\dot{\epsilon} = \frac{\Delta \epsilon}{\Delta t} \quad (1)$$

$$C_{\alpha\epsilon} = \frac{\Delta \epsilon}{\Delta \log t} \quad (2)$$

#### 7-2-4 ひずみおよび圧縮量と二次圧密係数の関係

図 7-3 3 (a) は、二次圧密係数と圧縮量の関係、(c) は同様にひずみとの関係を整理したものである。圧縮量は観測期間中の最大値で、通常は最終測定日に記録されるが、終盤で圧縮量が減少し始める場合（Area1 南側の深度 29m～32m，Area2 北側の深度 29m～31m，Area3 南側の深度 14m～20m など）は、その直前の圧縮量とした。また、ひずみも同様に最大圧縮量と記録した時点のひずみとしている。図 7-3 3 の下段の (b) は上段の (a) について、(d) は (c) について、それぞれ点線で囲んだ範囲の拡大である。下図は上図から、Area2 北側の  $j$ （深度 29m～31m），Area3 南側の  $t$ （深度 9m～14m）および  $x$ （深度 39m～41m）を除外していることになる。

図 (b) を見ると、圧縮量と二次圧密係数には明確な関係性を認めることができない。一方で、ひずみの大きさと二次圧密係数には明確な相関性を認める。

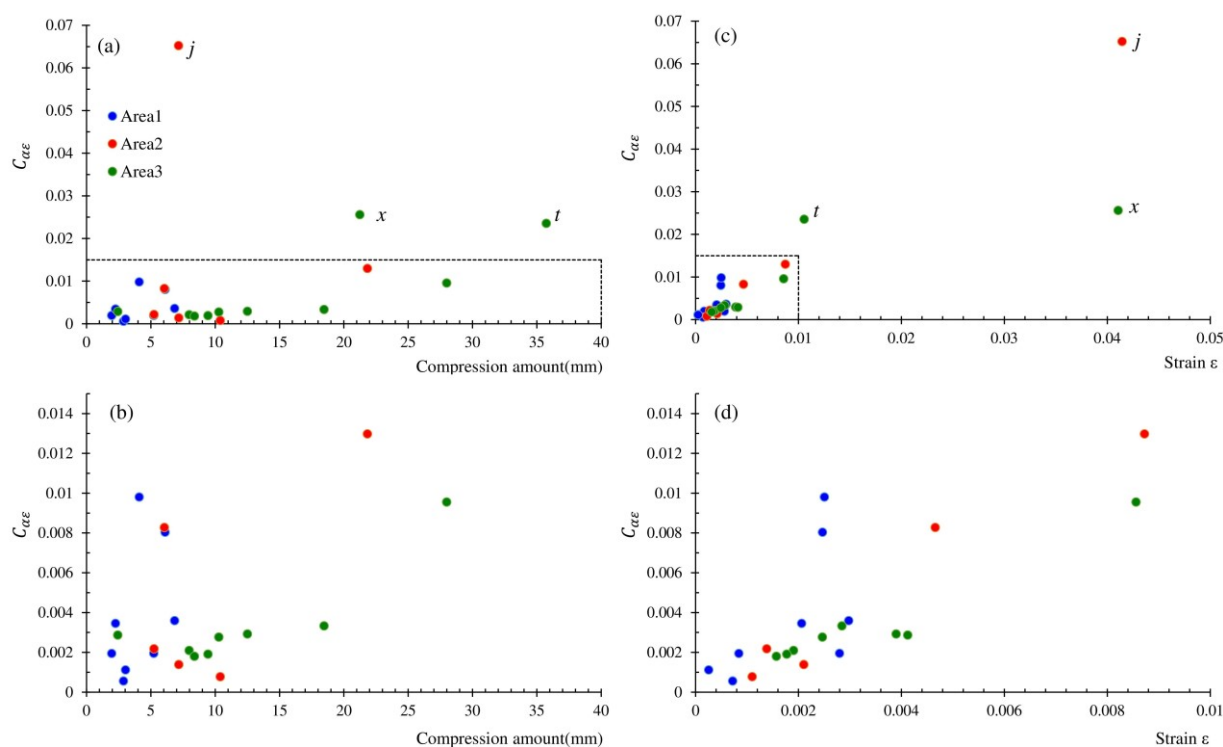


図 7-3 3 二次圧密係数と圧縮量の関係 (a)，(b) および二次圧密係数とひずみの関係 (c)，(d)

## 7-2-5 深度および層厚と二次圧密係数の関係

図 7-3 4は、(a) が深度と二次圧密係数の関係、(c) が層厚と二次圧密係数の関係を整理したものである。下段の (b) および (d) は、図 7-3 3と同様に上段の (a), (c) の点線で囲んだ範囲を拡大している。図 (a), (b) の深度は、データ整理の対象とした深層型沈下計の設置深度の上下間隔の中間点の深度で、試験盛土の施工に伴う計器の変位は考慮していない。図 (c), (d) の層厚は、データ整理の対象とした深層型沈下計の設置深度の上下間隔から、その間に含まれる砂層の厚さを除外したもので、試験盛土の施工完了日の沈下計の測定値を基準としている。なお、一部で粘性土層の間に薄く有機質土層が含まれている場合がある。

図 7-3 4からは、評価対象土層の厚さや深さと二次圧密係数の大きさには関係性を認めることができない。

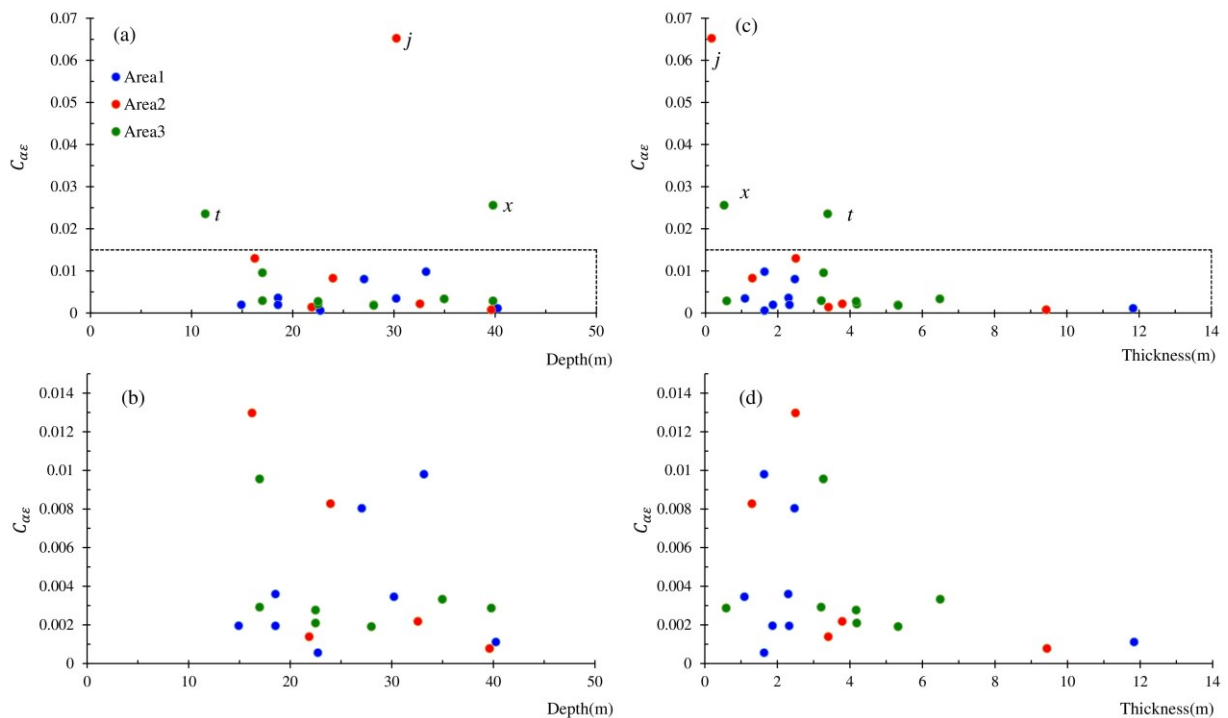


図 7-3 4 二次圧密係数と深度の関係 (a), (b) および二次圧密係数と層厚の関係 (c), (d)



### 7-3 室内試験との比較

第5章では，二次圧密係数を標準圧密試験における間隙比と経過時間の関係から求めている．これは，Bjerrum の疑似過圧密効果の概念図では，正規圧密領域の载荷を想定しているものと考えたためである．実際に軟弱地盤対策を検討する際は，長期圧密試験を行ったうえで二次圧密係数を求めている．長期圧密試験では，高速道路建設に伴う上載荷重の増加を想定したうえで試験に供するべき圧密応力を設定している．このため，第6章でも触れたとおり，必ずしも正規圧密領域での試験になっているとは限らない．

本章で求めた二次圧密係数は，試験盛土の施工によって増加した上載荷重により発生した沈下（圧密）の経時変化を整理したものである．二次圧密係数を室内試験と比較するにあたっては，長期圧密試験の結果を用いるのが妥当であるものとする．

#### 7-3-1 比較対象

図 7-3 5～図 7-3 7に，今回二次圧密係数を求めた土層と長期圧密試験用の試料を採取した位置の対比を示した．深層型沈下計の測定値を整理して求めた原位置の二次圧密係数は，上下の沈下計間の土層の減退的な評価となるが，室内試験の場合は当該の土層を厚さ20mmの供試体で代表して評価することになる．長期圧密試験は，右図の赤色で強調した試料で実施している．この試料の採取深度が，本章で整理の対象とした土層に含まれる場合に互いを比較するものとした．

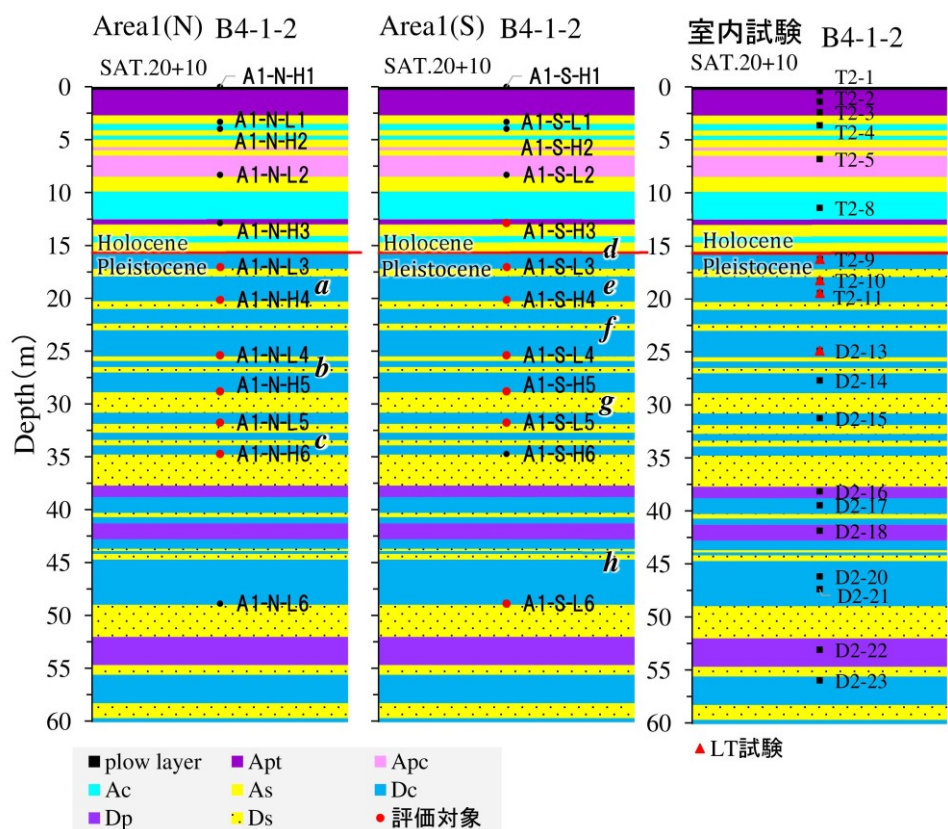


図 7-3 5 深層型沈下計の測定値の整理結果と長期圧密試験の結果の比較の対象（Area1）

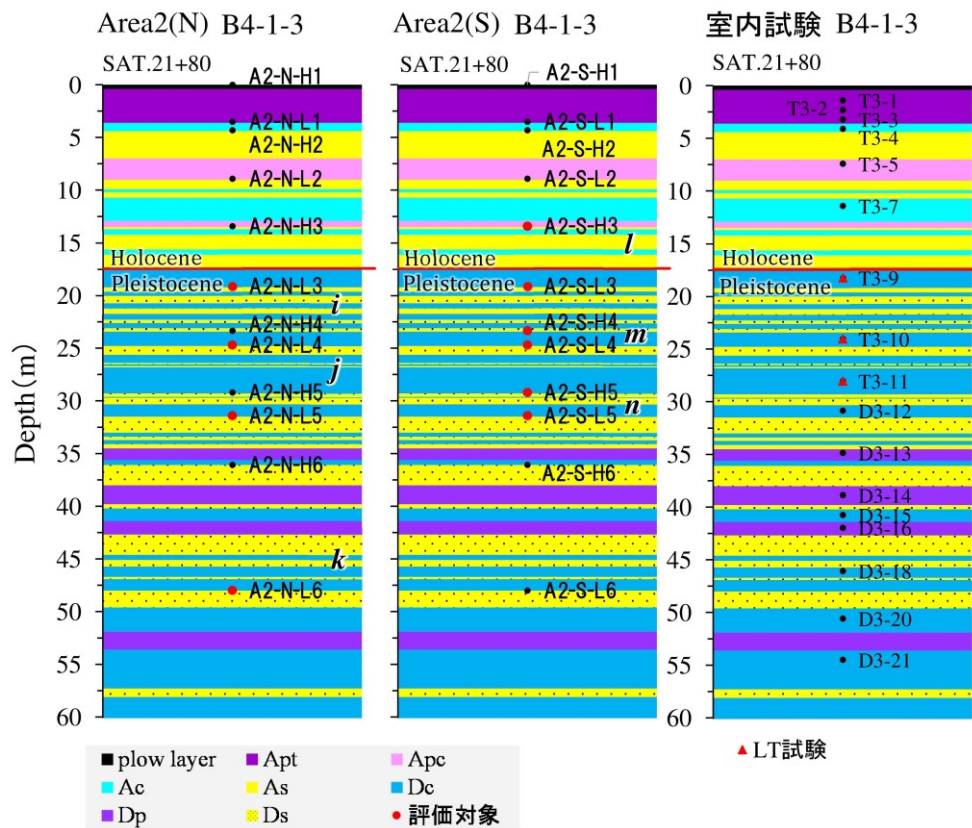


図 7-36 深層型沈下計の測定値の整理結果と長期圧密試験の結果の比較の対象 (Area2)

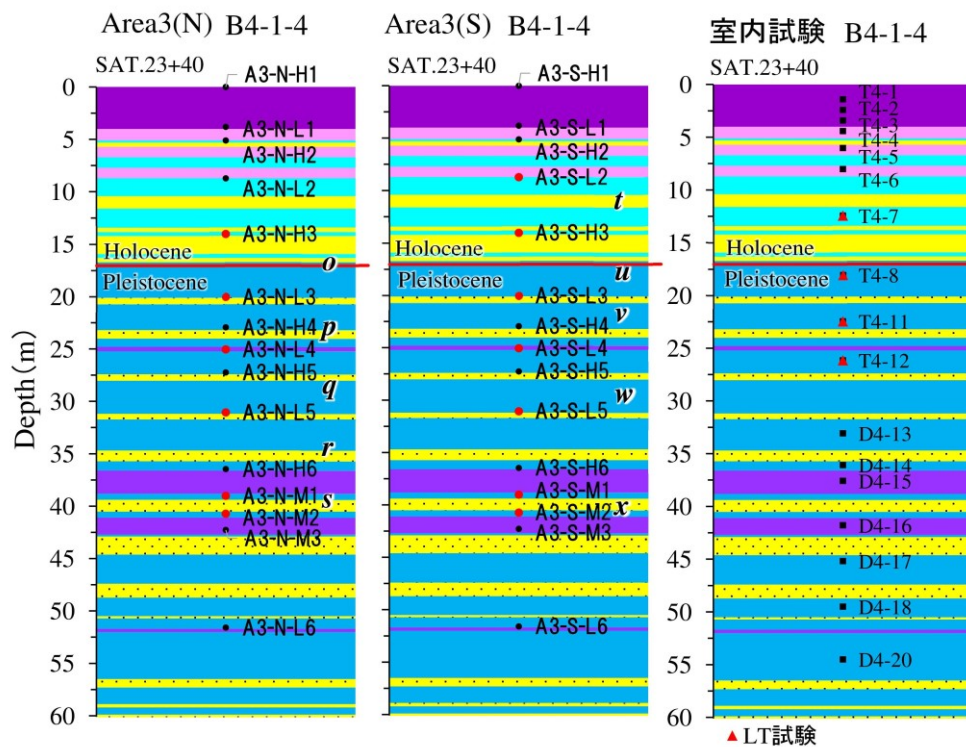


図 7-37 深層型沈下計の測定値の整理結果と長期圧密試験の結果の比較の対象 (Area3)



### 7-3-2 長期圧密試験と深層型沈下計の測定値の整理結果の比較

表 7-5 に、試験盛土の施工完了後の挙動から求めた原位置の二次圧密係数と、長期圧密試験から求めた二次圧密係数の比較の一覧を示す。長期圧密試験では、間隙比の変化で二次圧密係数 $C_\alpha$ を整理するため、ここでは  $C_{\alpha\varepsilon} = C_\alpha / (1 + e_0)$  としてひずみの変化に対応した二次圧密係数 $C_{\alpha\varepsilon}$ に換算している。図 7-3 8 は、表 7-5 をグラフにしたもので、図 (b) は図 (a) の点線で囲んだ範囲の拡大で、Area2 北側の  $j$  (深度 29m～31m) が除外されている。図から傾向を読み取ることはできないが、両者がほぼ一致するか、あるいは概ね一致する場合が複数確認できる。長期圧密試験で求められた二次圧密係数は、原位置の二次圧密係数をある程度代表しているものとする。

表 7-5 深層型沈下計の測定値の整理結果と長期圧密試験の結果の比較一覧

深層型沈下計の測定値の整理			長期圧密試験			
Area	No.	$C_{\alpha\varepsilon}$	No.	$e_0$	$C_\alpha$	$C_{\alpha\varepsilon}$
Area1(N)	$a$	0.0035952	T2-10	1.271	0.007	0.0030823
Area1(S)	$d$	0.0019517	T2-9	2.555	0.029	0.0081575
Area1(S)	$e$	0.0019461	T2-10	1.271	0.007	0.0030823
Area1(S)	$f$	0.0005594	T2-11	1.444	0.01	0.0040917
Area2(N)	$j$	0.0652134	T3-11	2.355	0.009	0.0026826
Area2(S)	$l$	0.0129748	T3-9	2.813	0.038	0.0099659
Area2(S)	$m$	0.0082757	T3-10	1.76	0.009	0.0032609
Area3(N)	$o$	0.0029204	T4-8	2.573	0.067	0.0187517
Area3(N)	$p$	0.0020974	T4-11	0.903	0.006	0.0031529
Area3(N)	$q$	0.0019086	T4-12	1.562	0.016	0.0062451
Area3(S)	$t$	0.0235377	T4-7	2.258	0.056	0.0171885
Area3(S)	$u$	0.0095533	T4-8	2.573	0.067	0.0187517
Area3(S)	$v$	0.0027644	T4-11	0.903	0.006	0.0031529
Area3(S)	$w$	0.0017986	T4-12	1.562	0.016	0.0062451

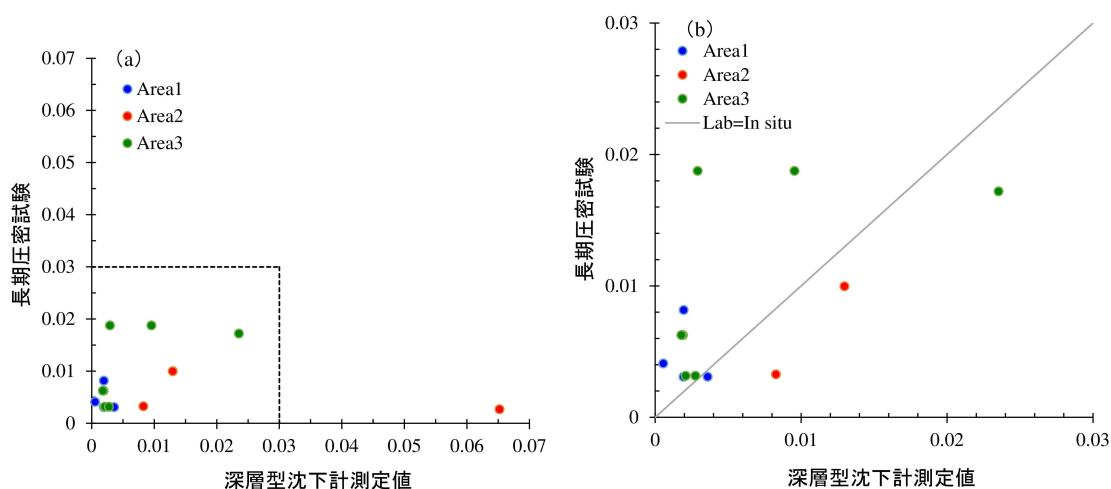


図 7-3 8 深層型沈下計の測定値の整理結果と長期圧密試験の結果の比較

## 7-3-3 既往研究と深層型沈下計の測定値の整理結果の比較

図 7-3 9は、第6章の図6-2 7と図6-3 0を上下に配置して比較したものである。上図で5本の沈下曲線が概ね平行となるのは、 $1 \times 10^5 \text{min}$  前後からである。下図でひずみ速度を読み取ると、概ね $1 \times 10^{-9} \text{s}^{-1}$ の辺りである。No.5を除き、1年間程度で観測が終了しているが、この時点でひずみ速度は概ね $1 \times 10^{-10} \text{s}^{-1}$ に低下している。

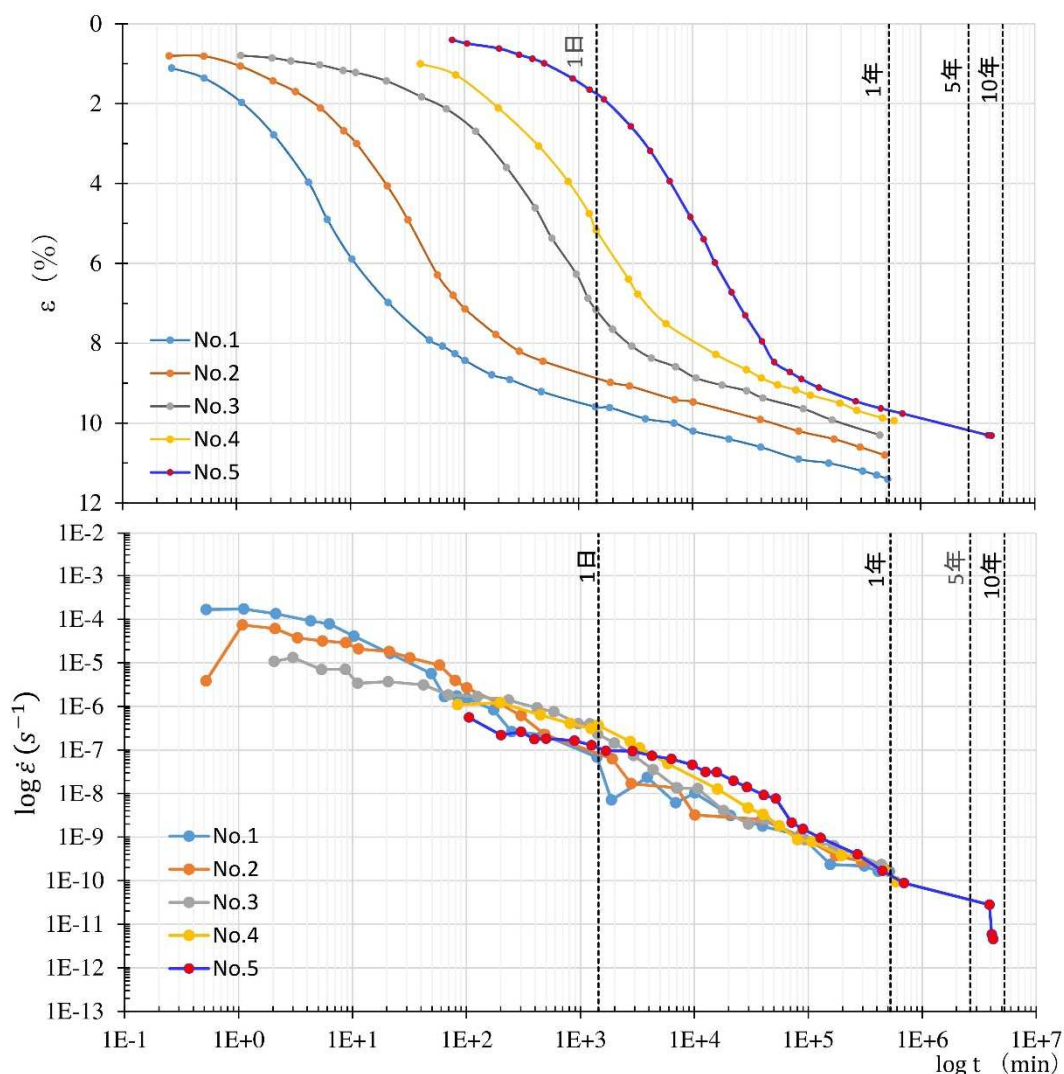


図 7-3 9 網干らの実験<sup>[1], [2], [3]</sup>による沈下曲線とひずみ速度の経時変化の比較

図 7-4 0 は、間隙比と自然含水比の関係について、白竜湖軟弱地盤の粘性土と網干らの実験で用いられた供試体（図中「Aboshi」）<sup>[2]</sup>の比較である。両者の性状には、大きな違いがないものとする。

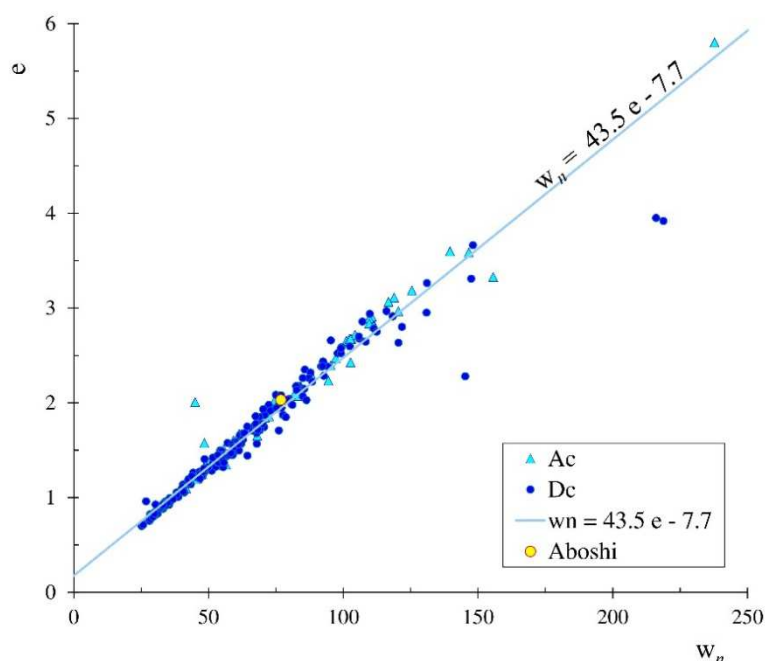


図 7-4 0 白竜湖軟弱地盤の粘性土と網干らの供試体<sup>[2]</sup>の比較

図 7-3 2 (b) に、網干らの実験の供試体 No.5 におけるひずみ速度と二次圧密係数の関係を追記して図 7-4 1 のとおり比較した。この際、二次圧密係数は、図 7-3 9 の上図において、ひずみ速度が  $1 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$  程度となった以降の各プロット間の傾きとして求めた。ひずみ速度が概ね  $1 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1} \sim 1 \times 10^{-10} \text{ s}^{-1}$  の範囲で網干らの実験値と白竜湖軟弱地盤における実測値は調和的である。実験値も実測値もひずみ速度と二次圧密係数に相関を認めるが、実験値はひずみ速度の低下に伴う二次圧密係数の低下の割合が実測値より小さい。

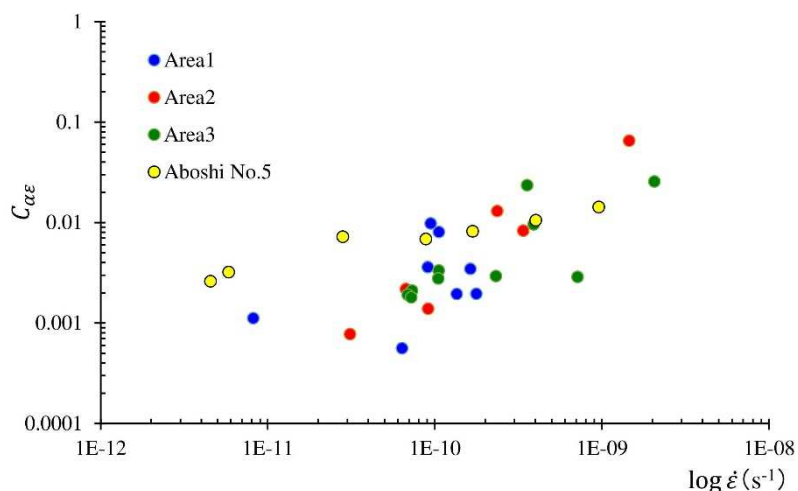


図 7-4 1 二次圧密係数とひずみ速度の関係についての実験値と実測値の比較

#### 7-4 本章のまとめ

第4章で示した、白竜湖軟弱地盤における高速道路盛土の試験施工について、施工完了後の沈下挙動のうち、特に深層型沈下計の測定値に着目して経時変化を整理した。Area2と3については、軟弱地盤対策工として施工した真空圧密工法の負圧載荷停止日、Area1については周囲に打設した矢板の撤去完了日をそれぞれ施工完了日とし、それ以降の深層型沈下計の測定値を整理した。上層に設置されている沈下計の位置（深度）と下層の沈下計の位置（深度）の差の経時変化は、その間の土層の厚さの変化に相当するので、一次元で考えれば工学ひずみに置き換えることができる。ひずみの経時変化を整理すれば、網干らが示したような沈下曲線<sup>[1]、[2]、[3]</sup>が原位置の事例として整理できるはずである。

実際には、試験盛土の施工完了後、隣接した工区での実施工を開始する必要性があったため、今回の評価期間はArea1で約550日、Area2で約600日、Area3で約430日となった。網干らの10年近くに及ぶ実験期間と比較すると、ごくわずかな評価期間である。

網干らの実験による沈下曲線では、供試体の寸法に寄らず逆S字型のカーブが描かれる。この逆S字カーブは試験開始から1年以内に勾配が緩くなり、平行線な直線状態となる。そして、厚さが5mの供試体では、その後10年以内にさらに勾配が緩くなったとされている。図7-18～図7-23に示した深層型沈下計の測定値を整理して求めた沈下曲線は、その形状だけを見ると、時間とともにひずみが増加する傾向にあり、網干らの沈下曲線で言えば平行な直線状態になる手前の形状に近い。試験盛土の測定値は、期間が短いものの1年以上の観測期間は優に経過しており、平行な直線状態が確認できるものと考えていたが、そのような状態にはならなかった。

網干らの実験では、沈下曲線が平行な直線になる範囲で $C_{ae} = 0.0095$ で、その後さらに勾配が緩くなると、 $C_{ae} = 0.0029$ となったとされている。これらの値は、図7-33および図7-34の下図において除外したArea2北側のj（深度29m～31m、 $C_{ae} = 0.065$ ）、Area3南側のt（深度9m～14m、 $C_{ae} = 0.024$ ）およびx（深度39m～41m、 $C_{ae} = 0.026$ ）を除き、概ね調和的である。

今回、深層型沈下計の測定結果を整理して沈下曲線の傾きを求めた。沈下曲線の形状から考えると、本来の二次圧密係数を求められていない可能性があるが、図7-41では、ひずみ速度や係数の大きさが網干らの実験結果と概ね調和的であり、一定の信頼性を持っているものとする。

網干らの実験では、二次圧密係数の大きさは供試体の寸法によらず一定であった<sup>[3]</sup>とされる。図7-34(c)、(d)を見ると、今回整理した結果が層厚と無関係であることが分かる。この結果は、網干らの実験結果と整合する。

また、図7-34(a)、(b)では、評価対象土層の深度にも無関係であった。さらに、図7-33(a)、(b)では圧縮量にも無関係であった。

室内試験（長期圧密試験）の結果から求めた二次圧密係数と、深層型沈下計の測定結果から求めた二次圧密係数の比較では、いくつかのデータで両者がほぼ一致した。また、概ね一

致しているとみなせそうなデータも複数あった。深層型沈下計の測定値はバラつきが大きく、例えば同じ試験エリアの同じ深度の土層でも、二次圧密係数を求めた結果が大きく異なる場合が多い（表 7-4）。このような状況を勘案すると、長期圧密試験で求めた二次圧密係数は原位置の二次圧密係数をある程度代表していると考えて差し支えないものと思料する。網干らの実験結果が示すように、有効応力の変化がなくても二次圧密係数が時間経過で低下するとすれば、深層型沈下計の測定結果で求めた二次圧密係数も時間の経過に伴い小さくなるはずだ。その結果、(残留)沈下の進行が停止したように感じる時が来るであろう。



《参考文献》

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.