

プレローディング工法で改良した高有機質土地盤の長期沈下挙動

深沢栄造*・山田清臣**・栗原宏武***

プレローディング工法で改良した高有機質土地盤の長期沈下予測と、これの経済的な抑止工を提案することを目的として、室内長期圧密試験と、現地改良地盤の長期沈下予測を行った。その結果、プレロード除荷後の地盤の膨張及び再沈下挙動は、土の含水比と改良地盤の過圧密比の値を用いることで説明できることが分かった。そして、プレロード除荷後の地盤の膨張・再沈下挙動の予測法と、長期沈下抑止技術の基本的な考え方、設計・施工の進め方について一提案を行った。

Key Words : preloading, soft ground, highly organic soil, consolidation, secondary compression, soil stabilization

1. はじめに

近年、大都市周辺においては土地不足から、従来顧みられなかった沼地や湿地の高含水比軟弱粘性土（主として高有機質土）地盤に、道路、住宅、工業団地等が造成されるようになってきた。これら、軟弱地盤における造成工事は一般に、圧密促進のための排水工及び載荷盛土工（プレローディング工法）を行って地盤を十分に圧密し、安定した地盤を造ることを目標として施工が行われている。

しかし、実際にはこのようにして地盤改良を行い造成しても、供用開始後長期に亘って地盤沈下を起し、地中埋設管の損傷あるいは上部構造物の機能損傷等の問題が発生してきている。このような問題が起こる原因の一つには、長期沈下を考慮したプレローディング工法の設計法及び施工法が十分に確立されていないことが挙げられる。例えば、設計時に供用開始後の残留沈下量を予測・設定し、この沈下量以内に実際の沈下を収めるためには、工事期間中にどの程度のプレロードをどの程度の期間、載荷すればよいかと言ったことが必ずしも明らかになっていないことなどである。

軟弱粘性土地盤に盛土造成を行う場合、載荷の方法は、図-1に示すように i) の一定荷重を長期間載荷する方法と、ii) の一定荷重で十分に圧密した後いくらかの圧密荷重を除荷する方法とがある。プレローディング工法を用いて行う盛土造成は、将来載荷されるであろう構造物荷重と同等か同等以上の盛土荷重を、工事期間中にあらかじめ載荷する方法で行われており、載荷のパターンは、図-1の ii) に相当する。i) の一定荷重を長期間載

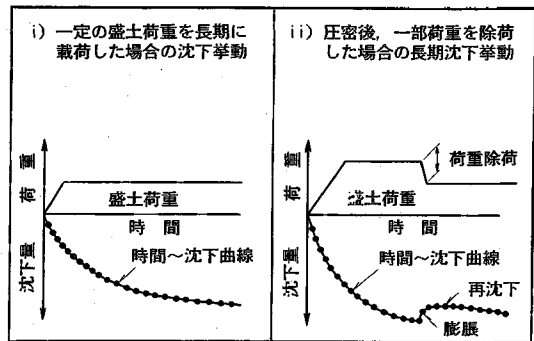


図-1 盛土載荷方法と時間沈下曲線

荷した時の沈下特性（二次圧密特性）については、多くの研究がなされており、自然含水比¹⁾、塑性指数²⁾、圧縮指数³⁾ほか、各種要因との相関関係⁴⁾についてかなり詳細に検討が行われている。これに対して、ii) の圧密圧力を除荷して地盤を人為的に過圧密の状態にした時の二次圧密については、研究の数も少なく⁵⁾⁻⁸⁾など、特に、圧縮性の大きい高有機質土地盤の場合は、不明の事項が多く残されている。

そこで、筆者らは、図-1の ii) に示す載荷パターンについて、プレローディング工法で地盤を人為的に過圧密の状態にした時の、軟弱粘性土地盤（主として高有機質土地盤）の長期沈下予測手法とこれの経済的な抑止工の提案を目標として、実験的研究をすすめてきた⁹⁾⁻²⁴⁾。研究は、図-2の研究フローに示すように、まず、①室内において、正規圧密粘土を用いた長期圧密試験を行い、長期沈下を定量的に表現し得るパラメータとして、二次圧密係数を取り上げ、粘土の各種土性値との相関関係を調べた⁹⁾。次いで、②標準圧密試験機を用いて、プレローディング工法を想定した“載荷除荷の長期圧密試験”を行い、二次圧密特性に影響を及ぼすと思われる圧密時間、圧密圧力、過圧密の程度、試料厚さ等の要因について定

* 正会員 鹿島技術研究所 主管研究員
(〒182 調布市飛田給 2-19-1)

** 正会員 工博 日本大学理工学部 教授

*** 正会員 工修 鹿島技術研究所 専門部長

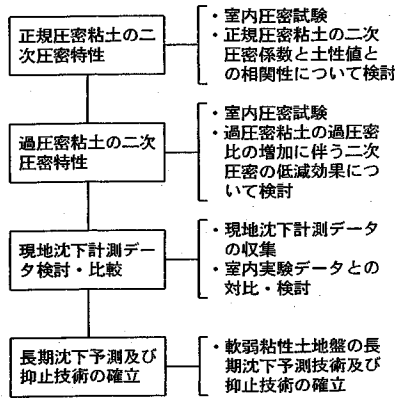


図-2 研究フロー

量的評価を試みた^{10)~20)}。さらに、③これら室内試験結果を基に、新しい考えで実施したプレローディング工法による盛土造成現場の、4~8年の長期間に亘る現地沈下計測データの整理検討を行い、長期沈下予測及び沈下低減は、過圧密比（以下、OCRと表示する）を用いて説明することが有効であることを示した^{21~24)}。

本論文は、これら研究結果を取りまとめ、プレローディング工法で地盤改良した高有機質土地盤の、プレロード除荷後の地盤の膨張及び再沈下挙動の予測法と、それに基づく長期沈下抑止技術の基本的な考え方及び設計・施工の進め方について一提案を行ったものである。

2. 研究で対象とした土質

本研究で対象とした土質は、二次圧密沈下量が極めて大きく、かつ実構造物に対しても大きな被害を及ぼすと言われている自然含水比400~900%の高有機質土である。試料は、北海道、茨城、千葉及び神奈川の泥炭地やおぼれ谷地帯の工事着手前の宅地造成現場から採取したもので、代表的な土性値を表-1に示す。

また、本研究では、実際にプレローディング工法を用いて地盤改良した工事現場で、工事期間中から供用後の4~8年間にわたって現場において長期沈下挙動の調査を行っている²¹⁾。計測を行った現場は、表-2に示す①、②及び③の3現場である。施工は2~9m高さの盛土を行い、半年から1年間放置して、その後1~4.5m高さの盛土を除荷して過圧密地盤になるように地盤改良を行っている。

3. プレロード除荷後の地盤の挙動予測

(1) プレロード除荷後の変位挙動

筆者らがこれまで実施してきた室内の載荷除荷の長期圧密試験^{10)~20)}及び現地計測^{21)~24)}による、プレロード除荷後の地盤挙動の代表的なものを図-3~4に示す。

図-3は、室内において、標準圧密試験機を用いて行っ

表-1 室内試験の土性値一覧表

土性値	試料採取地					
	北海道	茨城	千葉	神奈川		
土粒子の比重	G_s	—	1.62	1.72	1.82	1.91
自然含水比	W_n	%	868	638	645	462
液性限界	W_L	%	—	541	429	433
塑性指数	I_p	—	—	448	254	249
強熱減量	L_t	%	—	53	51	33
分解度(水洗い法)	D_w	%	—	56	82	—
圧密降伏応力	p_c	kgf/cm ²	0.12	0.08	0.22	0.25
圧縮指数	C_c	—	11.0	7.3	6.3	4.6
圧密係数	c_v	cm ² /sec	5×10^{-3}	2×10^{-3}	5×10^{-3}	8×10^{-3}

表-2 現地計測の現場と土層構成・土性値

現場名称	① 現場			② 現場	③ 現場	
	高有機質土			高有機質土	高有機質土	
土層構成と沈下対象土層						
土質名称	—	—	高有機質土	高有機質土 シルト質粘土	高有機質土	
自然含水比	W_n	%	863	680	137.0	470
土粒子の比重	G_s	—	1.444	1.929	2.630	1.910
一軸圧縮強さ	q_u	kgf/cm ²	0.15	0.21	0.22	0.24
圧密降伏応力	p_c	kgf/cm ²	0.081	0.17	0.37	0.15
圧縮指数	C_c	—	12.55	10.80	0.72	4.95
圧密係数	c_v	cm ² /sec	1.6×10^{-2}	3.5×10^{-3}	2×10^{-3}	2.2×10^{-3}
体積圧縮係数	m_v	cm ³ /kgf	1.66	1.24	0.11	0.45

注) 土性値は、土質試験(JIS)で求めた値。

た長期圧密試験結果例¹⁰⁾である。試験は、プレロード荷重載荷前の試料の先行圧密圧力に相当する荷重(図中、 p_0 で表示、0.2 kgf/cm²)を24時間載荷した後、プレロード荷重に相当する荷重(p_p で表示、0.2 kgf/cm²)を60分間載荷し、その後、0.05~0.2 kgf/cm²の荷重を除荷(除荷荷重は、 p_u で表示)し、20日間放置した時の試料の経過時間と沈下の関係を調べたものである。また、図-4は、自然含水比800~900%の泥炭地盤における盛土造成工事の地盤沈下現地計測結果例²¹⁾である。

これらの図に示すように、プレロード除荷後の垂直変位は、プレロード除荷によって一旦膨張し、その後、膨張も沈下もほとんど起こらない平衡状態が続く、ある時間を経過すると再び沈下し始めるという動きを示している。そして、最大膨張に達した後の再沈下挙動(再沈下曲線)は、沈下量を普通目盛、時間を対数目盛で表した片対数紙上でほぼ直線を示すことが判明した。

以下、これらの室内及び現地計測データを基にして、プレロード除荷後の試料中の間隙水圧挙動、地盤の膨張

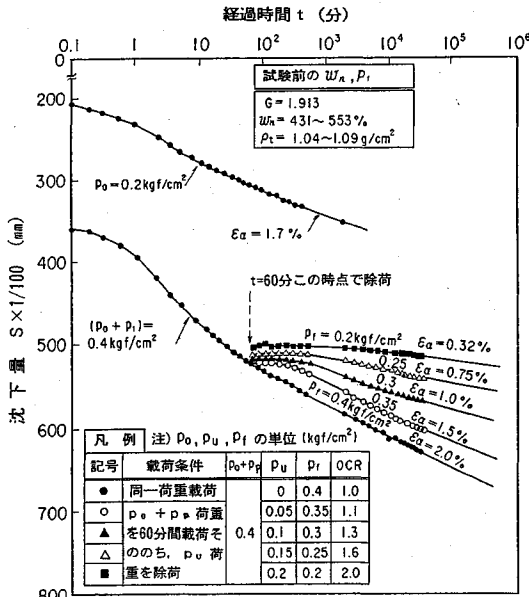


図-3 沈下量～log t 曲線 (室内試験データ)

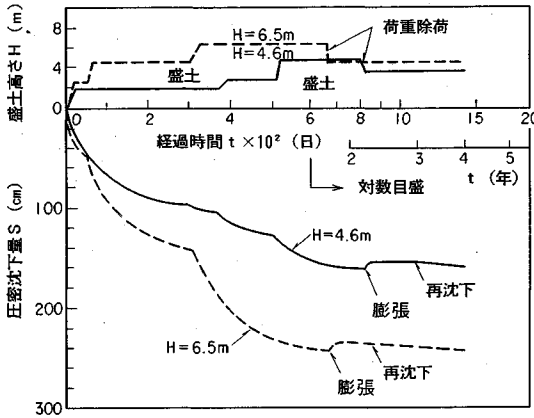


図-4 現場沈下計測結果例 (④現場の例²²⁾)

量, 再沈下開始時間及び再沈下曲線の勾配 (再沈下速度) の予測法について検討する。

(2) プレロード除荷後の間隙水圧挙動

プレロード除荷後の間隙水圧挙動は, 室内において図-5 に示す“分割型圧密試験機”を用いて調べた¹⁴⁾。

分割型圧密試験機による載荷除荷の圧密試験は, 直径 60 mm, 厚さ 20 mm 寸法の供試体 3 個の上端及び下端面の排水系統を直列に連結して, 片面排水条件で行った。圧密試験時の試料中の間隙水圧挙動は, No. 1, No. 2 及び No. 3 の各試料間に設置した間隙水圧計で測定した。

図-6 に試験結果の一例を示す。試験は, 試料の先行圧密圧力 (p_0) 0.4 kgf/cm² で予圧密した粘土試料に, プレロード荷重に相当する圧密圧力 (p_p) 2.8 kgf/cm² を 60 分間載荷し, その後, 1.6 kgf/cm² の荷重 (p_u) を

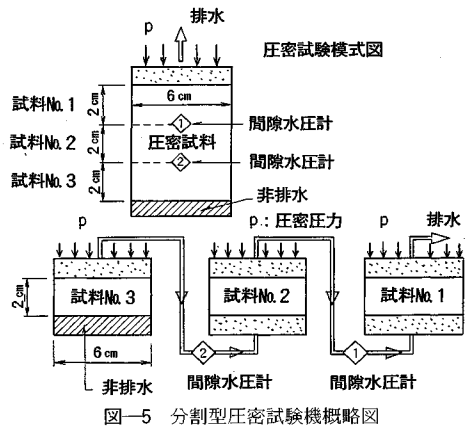


図-5 分割型圧密試験機概略図

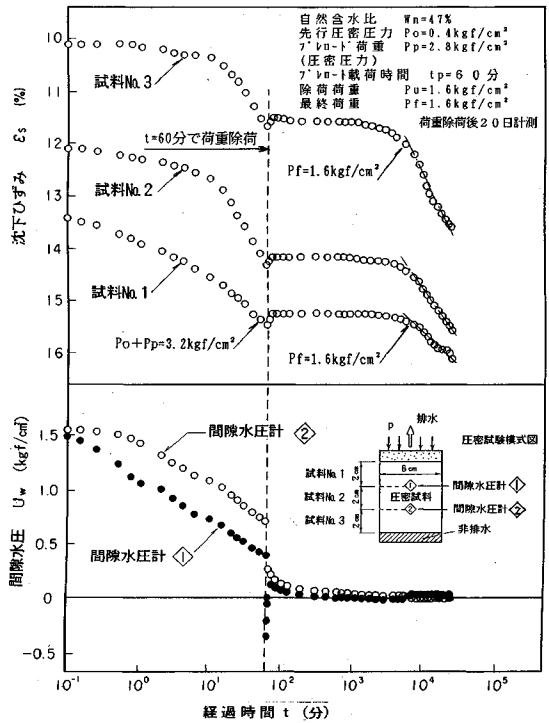


図-6 沈下ひずみと間隙水圧挙動 (分割型圧密試験機使用)

除荷して, 20 日間, 試料の沈下及び間隙水圧の挙動を調べたものである。一般に, プレローディング工法において行われている荷重除荷は, p_p 荷重による圧密度が 85~95% 程度進行した時点で行われている。当検討においても, 実際のプレローディング工法を想定して, p_p 荷重による一次圧密が一部未完了 (図-6 の試験ケースは, 沈下ひずみの平均圧密度で約 87%) の状態で, p_u の荷重除荷を行い一連の検討を行っている。

図-6 を基にして, 荷重除荷後の間隙水圧 (u_w) と沈下ひずみ ($\epsilon_s = (S/d_0) \times 100(\%)$, ここに, S : 沈下量, d_0 : 初期試料厚さ) の動きについて見てみる。 u_w は, 荷重除荷と共に一旦大きく減少し, 特に排水面に近い u_w

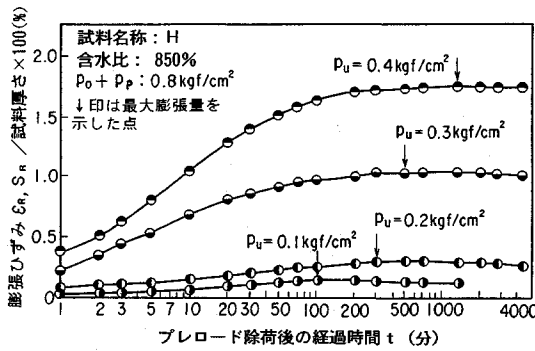


図-7 膨張ひずみとプレロード除荷後の経過時間の関係

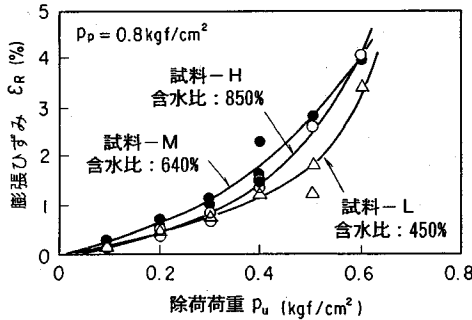


図-8 膨張ひずみと除荷荷重の関係

は負圧となるが、再び正の値を示し、その後、時間の経過と共に徐々に消散し、最終的にはゼロになるような動きを示している。このような間隙水圧挙動は、網干¹⁾らの研究においても同様な挙動を示すことが報告されている。

p_u 除荷後の ϵ_s は、荷重除荷に伴って一旦膨張した後、 u_w が時間と共に徐々に消散しているにも拘らず、ある期間ほぼ平衡の状態を示している。これは、排水面に近い負の u_w を示す部分の吸水による膨張現象と、排水面から離れた部分の残留 u_w の消散による沈下現象が均衡を保って、このような現象を示しているものと思われる。また、 ϵ_s は、 u_w の値がほぼゼロになった付近から再び沈下の方向に進む傾向を示している。これは、膨張終了後の、主に土粒子骨格のクリープによる沈下であると考えられるが、長期沈下試験の含水比は変化（低下）するということも考え合わせると、クリープのほかに、試験では計測できないごく微小の間隙水圧の消散による沈下も併せて発生しているものと思われる。

(3) プレロード除荷後の膨張量の予測

プレロード除荷後の地盤の膨張量の予測は、室内における載荷除荷の長期圧密試験¹³⁾で実験式を求め、現地計測データ²¹⁻²⁴⁾でこれの検証を行った。

室内試験の試料は、自然含水比 (w_n) 450%、640% 及び 850%、先行圧密圧力 (p_0) 0.2 kgf/cm²、0.1 kgf/cm² 及び 0.1 kgf/cm² の値を示す、3種類の高有機

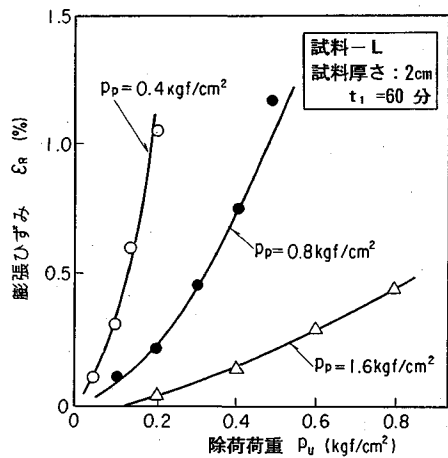


図-9 膨張ひずみと除荷荷重の関係 (p_p パラメータ)

質土（これらの試料をそれぞれ試料-L、試料-M、試料-Hと表示する）である。試験は、標準圧密試験機を用いて、プレロード荷重 (p_p) に相当する圧密圧力を 0.4~1.6 kgf/cm² の範囲で 60 分間載荷し、その後、0.2~0.8 kgf/cm² の荷重を除荷して、除荷後の膨張量を調べたものである。

この試験では、標準圧密試験機の圧密時間を 60 分間取っており、一次圧密がほぼ終了の時点で、荷重除荷を行っているものである。

試験結果を図-7、8に示す。図-7は、プレロード除荷後の時間と膨張ひずみ ($\epsilon_R = (S_R/d_0) \times 100(\%)$, ここに、 S_R : 膨張量) の関係を示したものである。この図に示すように、 ϵ_R は時間の経過とともに大きくなり、図中 ↓ 印で示す点で最大膨張ひずみ (ϵ_{Rmax}) を示し、その後、ごく緩やかであるが下方に向かう傾向を示している。そして、 ϵ_{Rmax} を示す時間は p_u が大きいものほど長くなっている。

図-8は、土の種類ごとに、 p_p 荷重 0.8 kgf/cm² 一定条件下における p_u と ϵ_R の関係を示したものである。この図から、 ϵ_R は p_u が大きくなるに従って、大きくなる傾向を示しており、その値は 0.5~4.0% の範囲にある。また、同図で、含水比の異なる 3 試料の値を比べてみると、3 試料とも ϵ_R はほぼ近似した値を示している。このことから、 w_n が 450~850% 程度の範囲内の高有機質土では、プレロードと除荷の荷重条件が同一であれば、 S_R に大きな差はないと見てよいようである。

図-9は、同一種類の土で p_p を変えた場合の ϵ_R と p_u の関係を見たものである。この図から、同一の p_u では、荷重を除荷する前の p_p が小さいもの程、 ϵ_R は大きく現れている。この結果から ϵ_R は、プレロードを除荷する前の p_p の影響を大きく受けることが分かる。

プレロード除荷後の S_R の推定には幾つかの方法^{25), 26)} が考えられている。ここでは、圧密沈下量の算定に用い

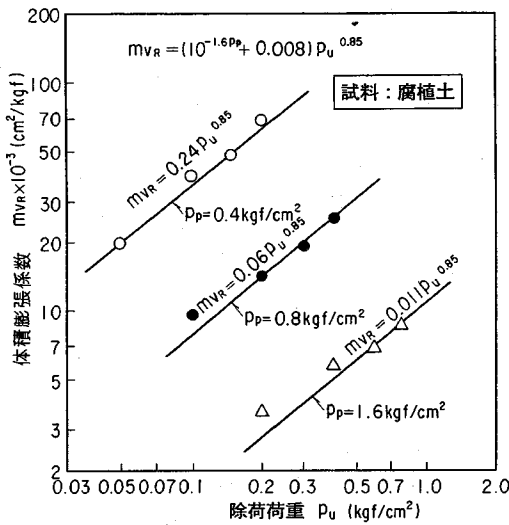


図-10 体積膨張係数と除荷荷重の関係

る体積圧縮係数 (m_v) と同じ考えで、膨張時の体積膨張係数 (m_{vR}) を式 (1) で定義し、 m_{vR} 、 p_p 及び p_u の相関関係から S_R の推定を試みた¹³⁾。

$$m_{vR} = \Delta \varepsilon_R / \Delta p_u \times 100 \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 m_{vR} : 体積膨張係数 (cm²/kgf)
 $\Delta \varepsilon_R$: 膨張ひずみの変化量 (%)
 Δp_u : 除荷荷重の変化量 (kgf/cm²)

図-9の試験結果を用いて、式 (1) から m_{vR} を求め、 p_p をパラメータとして m_{vR} と p_u の関係を示すと図-10に示すようになる。同図から、 m_{vR} と p_u の関係は、標準圧密試験の圧密圧力 p と m_v の関係で見られるように、両対数グラフ上でほぼ直線関係を示す。したがって、 m_{vR} は式 (2) で表すことができる。

$$m_{vR} = \alpha \cdot p_u^\beta \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 m_{vR} : 体積膨張係数 (cm²/kgf)
 α, β : 係数
 p_u : 除荷荷重 (kgf/cm²)

そして、図-10から、係数 α と β の値を求めると、

$$\alpha = 10^{-1.6p_p} + 0.008$$

$$\beta = 0.85$$

となる (この式の適用範囲は、 $p_p = 0.4 \sim 1.6$ kgf/cm²、 $p_u = 0.2 \sim 0.8$ kgf/cm²)。

この室内試験で得られた実験式から、土層厚さ D_0 の実際地盤の膨張量 S_R の算定は、式 (3) で示される。

$$S_R = m_{vR} \cdot p_u \cdot D_0$$

$$= (10^{-1.6p_p} + 0.008) \cdot p_u^{0.85} \cdot D_0 \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 S_R : 初期土層厚さ D_0 の膨張量 (cm)
 p_p : 荷重除荷前の土層中央点の有効上載荷重 = $p_p \cdot U / 100$ (kgf/cm²)
 U : p_p 荷重による平均圧密度 (%)

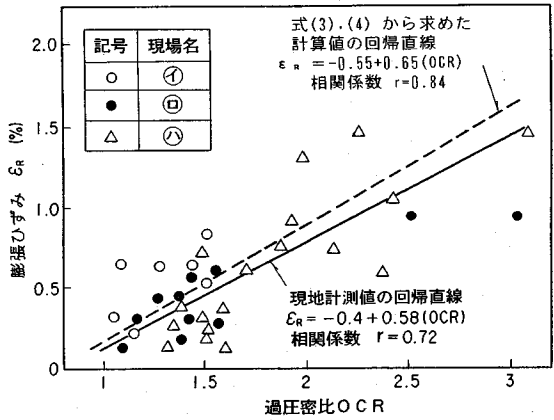


図-11 膨張ひずみと過圧密比の関係

p_u : 除荷荷重 (kgf/cm²)

D_0 : 初期土層厚さ (cm)

式 (2) の係数 α 中の p_p と式 (3) の p_p は、荷重除荷前の有効上載荷重を示す値であるが、室内試験の除荷前の有効上載荷重は p_p 荷重とほぼ同値であることから、式 (2) では p_p の値を用いている。一方、実際地盤の除荷前の有効上載荷重は、 p_p 荷重による圧密度を考慮する必要があることから、式 (3) では、 $p_p (= p_p \cdot U / 100)$ を用いているものである。

ここで、地盤に載荷しているプレロードの大きさを、式 (4) に示す OCR で表し、現地計測によって得られた ε_R を OCR の関係で整理すると、図-11 に示すようになる。

$$OCR = \frac{p_0 + p_p \cdot U / 100}{p_0 + p_p - p_u} \dots \dots \dots (4)$$

ここに、OCR : 土層中央点の平均過圧密比

p_0 : 盛土載荷前の土層中央点の有効上載荷重 (kgf/cm²)
 p_p : プレロード荷重 (kgf/cm²)
 U : p_p 荷重による平均圧密度 (%)
 p_u : 除荷荷重 (kgf/cm²)

同図から、現地計測の値には若干のばらつきも見られるが、 ε_R は OCR が大きくなるに従って大きくなる傾向を示している。また、図には現地計測値の回帰直線を実線で、室内実験で得られた算定式 (3) と OCR 定義の式 (4) に、現地施工の荷重条件を代入して求めた計算線を破線で示したが、現地計測値の回帰直線は計算線に近似している。これらの結果から、プレロード除荷に伴う膨張量は、式 (3) の算定式あるいは図-11 の計算から求めた回帰直線式で予測できるものと思われる。

(4) プレロード除荷後の再沈下開始時間予測

プレロード除荷後の再沈下開始時間 (t_s) とプレロード載荷時間 (t_p) の関係を図-12 に示す。同図から、 t_s は t_p が長いほど長くなるという傾向を示している。そ

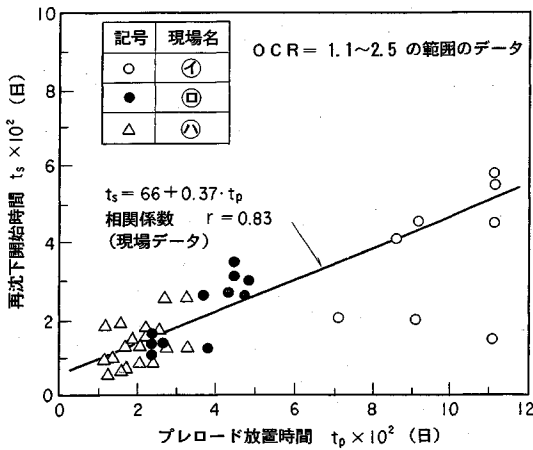


図-12 再沈下開始時間とプレロード放置時間の関係

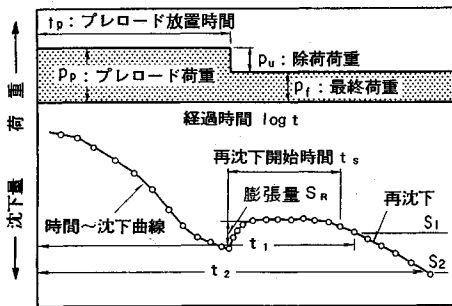


図-13 プレロード除荷後の S~log t 模式図

して、 t_s は、現地計測データ^{21)~22)}によれば、 t_p の約 0.4 倍程度となっている。この値は、実際工事における施工管理時の一つの目安になるものと思われる。

(5) プレロード除荷後の再沈下速度予測

プレロード除荷後の再沈下曲線は、図-3 にも示したように、時間を対数目盛にとった片対数紙上ではほぼ直線で表すことができる²⁰⁾。図-13 に、プレロード除荷後の時間沈下曲線の模式図を示したが、同図に示す再沈下曲線の勾配(二次圧密沈下速度)を表示する方法としては、種々の整理方法が提案されている¹⁾。筆者らは、沈下ひずみで表示する式(5)の方法を提案してきた^{9), 18), 19)}。

$$\epsilon_a = \frac{S_2 - S_1}{D_0 (\log t_2 - \log t_1)} \times 100 (\%) \quad (5)$$

ここに、 ϵ_a : 二次圧密係数 (%)
 t_1, t_2 : 図-13 に示す経過時間 (日)
 S_1, S_2 : t_1, t_2 時点の沈下量 (cm)
 D_0 : 初期土層厚さ (cm)

図-14 は、室内の長期圧密試験から得られた二次圧密係数 (ϵ_a) を OCR との関係でプロットしたものである。同図から、 ϵ_a と OCR の関係は、OCR が増加するに従って減少する傾向を示しており、特に、OCR が小

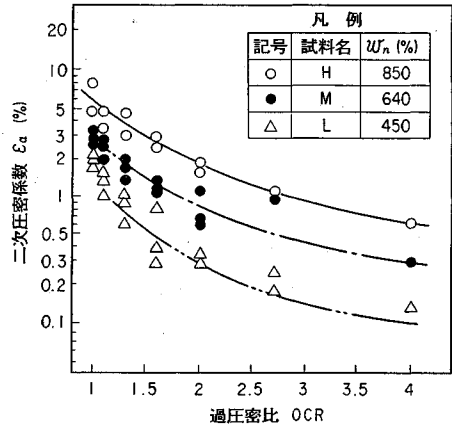


図-14 二次圧密係数と過圧密比の関係(室内試験データ)

さい 1~2 の範囲での減少が、顕著に現れている。また、土の種類ごとに ϵ_a の値を見ると、自然含水比が高い試料ほど ϵ_a は大きくなっている。

ここで、室内で得られた図-14 の結果を基にして ϵ_a と OCR の関係式を求めると、図-15 に示すようになり、式(6)の形で表わされる。

$$\epsilon_a = 10^{A+B \cdot OCR} + C (\%) \quad (6)$$

図-15 から、各々の土試料について係数 A, B 及び C の値を求めると式(7)~式(9)のようになる。

$$\text{試料-H: } \epsilon_a = 10^{1.3-0.6 OCR} + 0.5 (\%) \quad (7)$$

$$\text{試料-M: } \epsilon_a = 10^{0.95-0.6 OCR} + 0.25 (\%) \quad (8)$$

$$\text{試料-L: } \epsilon_a = 10^{0.8-0.75 OCR} + 0.1 (\%) \quad (9)$$

ただし、 $1 \leq OCR \leq 4$

この ϵ_a は、自然含水比 w_n と強い相関があることは、すでに報告した⁹⁾。そこで、式(7), (8) 及び(9)の係数 A, B 及び C の値を、 w_n との関係で示すと図-16 のようになる。研究で対象とした高有機質土は、 w_n が約 400~900% の範囲の土であるが、同図に示すように係数 A, B 及び C は w_n と、ある一定の関係を持っている。

これらの試験結果を基にして、筆者らは、二次圧密沈下量の予測式(実験式)の提案を試みた。提案する方法は、土の w_n から、図-16 を用いて係数 A, B 及び C を求め、式(6)から二次圧密係数を算出して、式(10)から二次圧密沈下量 (S_{se}) を推定するものである。

$$S_{se} = (\epsilon_a / 100) \cdot D_0 \cdot \log t \quad (10)$$

ここに、 S_{se} : 二次圧密沈下量 (cm)
 ϵ_a : 二次圧密係数 (%)
 D_0 : 初期土層厚さ (cm)

t : 時間、図-13 の盛土開始時点を原点にとった時間 (t_2/t_1) (日)

次に、現地計測データを整理し、得られた再沈下曲線の ϵ_a と OCR の関係を図-17 に示す。同図から、現地

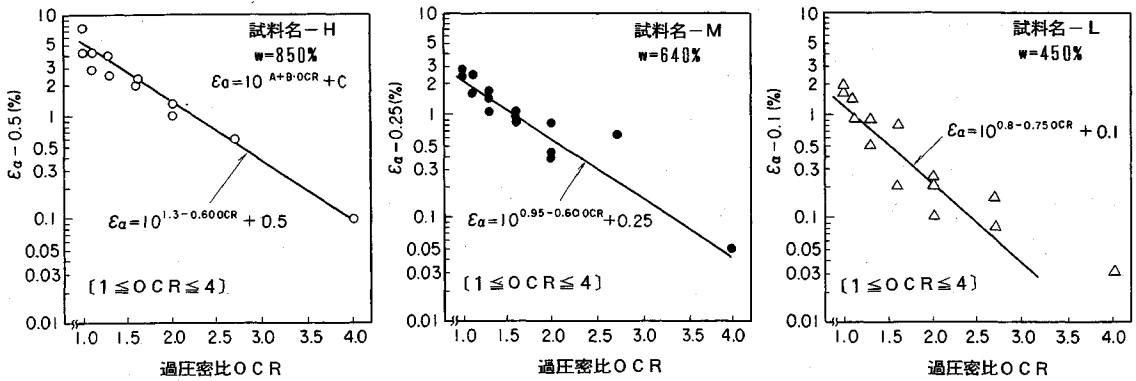


図-15 log ε_α と過圧密比の関係 (室内試験データ)

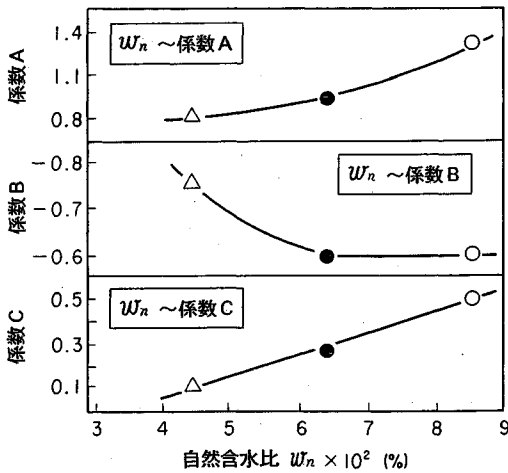


図-16 係数 A, B 及び C と自然含水比の関係

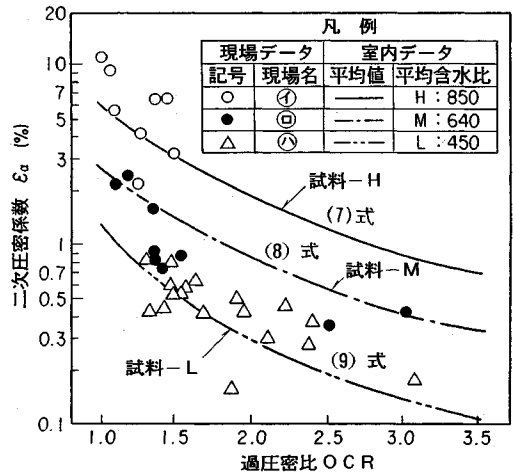


図-17 log ε_α と過圧密比の関係 (現地計測データ)

計測データも室内試験データと同様に、OCRとε_αの関係はOCRが増加するに従ってε_αが減少するという関係にある。

そこで、図-17の中に、室内試験からの提案式(7)、(8)及び(9)の推定線も併記した。その結果、同図から分かるように、現場データは計算値と良い一致を示しており、当提案式で実測値を十分表現できることが分かった。

4. プレローディング工法による長期沈下抑止技術

(1) 設計の考え方

従来、プレローディング工法の設計においては、長期沈下を定量的に取扱い、具体的に設計に取り込むことはほとんど行われていないと言ってよい。

今回、室内の長期圧密試験と現地長期沈下計測データを基にして、プレローディング工法におけるプレロード除荷後の高有機質土地盤の膨張及び再沈下挙動の一予測法について提案を行った。

そこで、プレローディング工法の設計を、図-18に示すような方法で進めていくことを提案する。

すなわち、

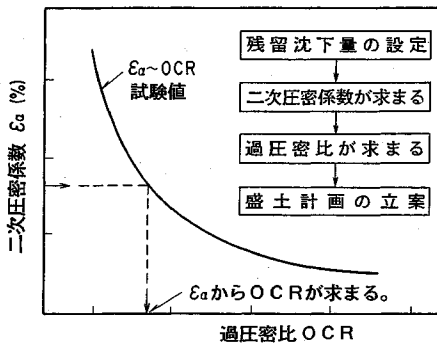
- ①まず、造成工事の計画・設計時に、将来に対して許容する地盤の残留沈下量を設定し、
 - ②この残留沈下量以内に、沈下量を抑えるために必要な改良対象粘土の二次圧密係数ε_αを求める、
 - ③このε_αから、改良目標とする地盤のOCRを求め、
 - ④このOCRを満足するプレロード荷重及び除荷荷重の大きさを求めて、盛土施工計画を立案する、
- という方法である。

この方法によれば、事前に地盤の残留沈下量を設定し、この残留沈下量以内に抑えるためのプレロード計画を立案することができ、造成地盤の要求品質に応じた合理的な設計・施工計画ができる。

(2) 本工事における過圧密比の取り方

上記の設計手順の中で、OCRをどの程度にとれば良いかが問題となる。

そこで、まず、OCRの増加に伴うε_αの減少の程度に



図一八 長期沈下を考慮したプレローディング工法の設計の考え方

ついて、 w_n の異なる試料の ϵ_α とOCRの関係を、同一条件で比較するために式(11)に示すような方法で整理した。

$$R = \epsilon_{\alpha i} / \epsilon_{\alpha 0} \dots \dots \dots (11)$$

ここに、 R ：二次圧密係数比

$\epsilon_{\alpha i}$ ：各々のOCR点の二次圧密係数(%)

$\epsilon_{\alpha 0}$ ：OCR=1.0の時の二次圧密係数(%)

式(11)で求められる R は、OCRの増加に伴う ϵ_α の減少の程度を示しているものである。これを R とOCRの関係で図示すると、図一十九のようになる。同図から、値には若干のばらつきも見られるが、OCRの増加に伴う ϵ_α の減少の程度は、OCR値で1.5付近までの減少量が大きく、1.5を越えた後の ϵ_α の減少量は、OCR 1.5までの減少量に比べて極めて小さくなる。

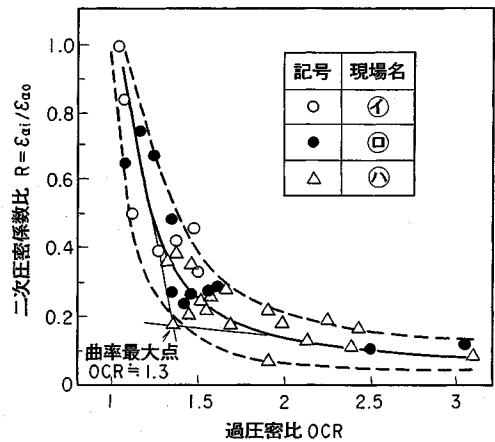
ちなみに、曲率最大点のOCRを求めてみると約1.3となる。これらの検討結果から、長期沈下を抑止するための過圧密比の値としての一つの目安としては、OCR=1.3~1.5程度の値を取ることが有効であると言えようである。ただし、実際工事のOCRの採用においては、造成地盤の使用目的、全体工事の工期、工費及び目標とする品質等を総合的に判断し、決めていくことになる。

また、実際工事の設計において、対象とする高有機質土層の ϵ_α とOCRの関係を求める場合、式(7)~式(9)で求めることができるが、さらに、室内においてJIS規格の標準圧密試験機を用いた載荷除荷の長期圧密試験を実施することによって、工事で対象とする高有機質土の ϵ_α とOCRの関係を正確につかむことができる。

5. 結 論

プレローディング工法で改良した高有機質土地盤の長期沈下予測の確立を目標とした、室内実験及び現地沈下計測結果から、以下の結論を得た。

1) プレロード除荷後の地盤の変形性状は、除荷によって地盤は一旦膨張し、その後は膨張も沈下も起こらない平衡状態が続き、ある時間を経過すると再び沈下しはじめる。



図一十九 二次圧密係数比と過圧密比の関係

2) プレロード除荷後の供試体中の間隙水圧は、荷重除荷によって一旦負圧となり、その後、正圧に戻り、時間の経過と共に消散し最終的にはゼロになる。間隙水圧がゼロになった付近から、再沈下が始まる。

3) プレロード除荷に伴う地盤膨張は、プレロード荷重とプレロード除荷荷重の大きさに影響を受け、膨張量は式(3)で予測できる。

4) 再沈下開始時間 t_s は、盛土載荷時間 t_b と良い相関を示し、 t_b が長いほど長くなる。そして、その時間は現地計測データで、 t_b の約0.4倍である。

5) 再沈下の速度を、式(5)で示す二次圧密係数 ϵ_α で定義すると、 ϵ_α は過圧密比OCRが増加するに従って小さくなる。また、地盤の自然含水比 w_n との関係では、 w_n が高くなるに従って大きくなる傾向を示す。

6) ϵ_α は、式(7)、(8)及び(9)で求められる。

7) プレローディング工法の設計を、次のように提案した。まず、残留沈下量を設定し、この残留沈下量を満足する地盤のOCRを求め、このOCRを満足するプレロード荷重及び除荷荷重の大きさを求めて、盛土施工計画を立案する方法である。

8) 長期沈下抑止のためのOCRの値は、1.3~1.5付近の値を採用するのが適当と考える。

9) 室内において、JIS規格の標準圧密試験機を用いた載荷除荷の長期圧密試験を実施することによって、工事で対象とする粘土の ϵ_α とOCRの関係を正確につかむことができる。

6. おわりに

以上、室内及び現地計測データを基にして、プレローディング工法で地盤改良した高有機質土地盤のプレロード除荷後の地盤の膨張及び再沈下挙動について検討を行った。次いで、プレロード除荷後の地盤の膨張及び再沈下挙動の一予測法を提案した。また、長期沈下抑止技術の基本的な考え方、設計・施工の進め方についても示

した。

なお、本文をまとめるに当たっては、現場データの収集に関係各位のご協力を賜り、ここに深謝の意を表します。

記号説明

- d_0 : 初期試料厚さ (cm)
- D_0 : 初期土層厚さ (cm)
- H : 盛土高さ (cm)
- m_{vR} : 体積膨張係数 (cm^2/kgf)
- OCR: 過圧密比
- p_0 : 先行圧密圧力、盛土載荷前の土層中央点の有効上載荷重 (kgf/cm^2)
- p_e : 荷重除荷前の土層中央点の有効上載荷重 (kgf/cm^2)
- p_f : 最終荷重 (kgf/cm^2)
- p_p : プレロード荷重 (kgf/cm^2)
- p_u : 除荷荷重 (kgf/cm^2)
- R : 二次圧密係数比
- S : 沈下量 (cm)
- S_{se} : 二次圧密沈下量 (cm)
- S_R : 膨張量 (cm)
- t_p : プレロード放置時間 (日)
- t_s : 再沈下開始時間 (日)
- U : p_p 荷重による平均圧密度 (%)
- u_w : 間隙水圧 (kgf/cm^2)
- ϵ_R : 膨張ひずみ (%)
- ϵ_s : 沈下ひずみ (%)
- ϵ_α : 二次圧密係数 (%)
- $\epsilon_{\alpha i}$: 各々の OCR 点の二次圧密係数 (%)
- $\epsilon_{\alpha 0}$: OCR が 1.0 の時の二次圧密係数 (%)

参考文献

- 1) Mesri, A.: Coefficient of Secondary Compression, Proc. ASCE, SM1, pp.123~138, 1973.
- 2) 竹嶋正勝: 軟弱地盤盛土における長期沈下に関する二、三の知見, 土と基礎, Vol.27, No.3, 1979.
- 3) 安川郁夫: 粘土の二次圧密特性についての考察, (第2報), 第18回土質工学研究発表会, pp.213~216, 1983.
- 4) 安川郁夫・嘉門雅史: 粘性土の二次圧密における荷重条件の影響, 土質工学会論文報告集, Vol.27, No.2, pp.93~106, 1987.
- 5) 室町忠彦・渡辺進: プレローディング工法に関する基礎的実験, 土と基礎, Vol.11, No.6, pp.3~10, 1963.
- 6) 網干寿夫・松田博: 層別計測による事前圧密工法の基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第340号, pp.139~144, 1983.
- 7) 赤石勝・外崎明・似内政康・稲田倍穂: サーチャージ除荷後の沈下予測, 土木学会論文報告集, 第315号, pp.95~101, 1981.
- 8) 能登繁幸: 泥炭地盤の沈下量の予測に関する考察, 土質

- 工学論文報告集, Vol.27, No.2, pp.107~117, 1987.
- 9) 栗原宏武・深沢栄造: 粘性土の長期圧密特性に関する研究(その1), 鹿島建設技術研究所年報, Vol.34, pp.227~232, 1986.
- 10) 栗原宏武・深沢栄造: 腐植土の長期沈下に関する室内試験, 第19回土質工学研究発表会, pp.225~226, 1984.
- 11) 栗原宏武・深沢栄造: 腐植土の長期沈下に関する室内試験(その2), 第20回土質工学研究発表会, pp.215~216, 1985.
- 12) 栗原宏武・深沢栄造: 腐植土の長期沈下に関する室内試験(その3), 第21回土質工学研究発表会, pp.231~232, 1986.
- 13) 深沢栄造・埴信之: 高有機質土地盤のプレロード除荷後の膨張量について, 土木学会第44回年次学術講演会第3部門, pp.394~395, 1989.
- 14) 埴信之・深沢栄造: 分割型圧密試験機を用いた粘性土の長期圧密試験, 第24回土質工学研究発表会, pp.385~386, 1989.
- 15) 山田清臣・鎌尾彰司: 圧密圧力除荷後の長期沈下特性, 第25回土質工学研究発表会, pp.379~380, 1990.
- 16) 山田清臣・鎌尾彰司: 圧密圧力除荷後の長期沈下特性(その2), 第26回土質工学研究発表会, pp.319~320, 1991.
- 17) 鎌尾彰司・山田清臣: 圧密圧力除荷後の長期沈下特性(その3), 第27回土質工学研究発表会, pp.349~350, 1992.
- 18) 栗原宏武・深沢栄造: 粘性土の二次圧密特性に関する研究(その2), 鹿島建設技術研究所年報, Vol.35, pp.173~178, 1987.
- 19) 栗原宏武・深沢栄造: 有機質土の二次圧密特性に関する研究(その3), 鹿島建設技術研究所年報, 第36号, pp.209~214, 1988.
- 20) 深沢栄造・埴信之: プレローディング工法で過圧密状態にした高有機質土の二次圧密特性, 土質工学会高有機質土に関するシンポジウム発表論文集, pp.88~92, 1989.
- 21) 正木浩・戸川隆一・長谷川正勝・富高康雄・三田賢治・栗原宏武・深沢栄造: 事前圧密工法による腐植土地盤の長期沈下対策例について, 第21回土質工学研究発表会, pp.229~230, 1986.
- 22) 深沢栄造・栗原宏武: プレロード撤去後の長期沈下挙動の現場実測例, 土と基礎, Vol.39, No.8, pp.17~22, 1991.
- 23) E. Fukazawa and H. Kurihara: Estimation of Long-Term Settlement for Soft Clay Improved by Preloading Method, Geo-Coast'91 Proc. of the International Conference on Geotechnical Engineering for Coastal Development, Yokohama, pp.183~186, 1991.
- 24) 栗原宏武・深沢栄造: プレローディング工法における地盤の挙動予測(その4), 鹿島技術研究所年報, 第40号, pp.183~190, 1992.
- 25) 網干寿夫・石井敬一・花井光昭・福田直三: プレローディング荷重撤去後の地盤の挙動に関する考察, 第14回土質工学研究発表会, pp.313~316, 1979.
- 26) 網干寿夫・石井敬一・花井光昭・福田直三・先森樹樹: プレローディング荷重撤去後の地盤の挙動の考察(その2), 第16回土質工学研究発表会, pp.253~256, 1981.

(1993.5.27 受付)

PREDICTING LONG TERM SETTLEMENT OF HIGHLY ORGANIC SOIL GROUND IMPROVED BY PRELOADING

Eizo FUKAZAWA, Kioomi YAMADA and Hirotake KURIHARA

In order to establish a method of estimating the long term settlement of highly organic soil overconsolidated by preloading, a series of laboratory and field measurements were carried out. Observation of ground movement during preloading and unloading indicate that primary settlement occurs first and then unloading makes the ground swell. Afterwards, secondary settlement occurs with a liner relationship between settlement and the logarithm of time.

Based on these findings, a method of estimating the amount of swelling and secondary settlement was established empirically for practical use. The proposed formulas make use of overconsolidation ratio, water content, duration of loading, and soil data (initial pore ratio, thickness of settlement layer, etc).
