

プレロード盛土工法による宅地地盤安定化のための評価方法について

みくに のりひと
三國 宣仁

四国地方整備局 大洲河川国道事務所 工務第一課 (〒795-8512 愛媛県大洲市中村210)

平成22年6月、愛媛県大洲市長浜町上老松地区において、土地利用一体型水防災事業（以下、上老松水防災事業）による1次盛土（山側盛土）を施工後、その上に家屋を建築して頂いた。その後2次盛土（川側盛土）を施工したところ、連れ込み沈下現象によって家屋に傾斜被害が発生。詳細調査の結果、細砂・シルトを主体とした「中間土」と呼ばれる対処の難しい地盤層であると判断した。そこで、限られた工期内で、宅地造成を目的とした軟弱地盤を安定させるための方法として、プレロード盛土工法（载荷盛土工法）を実施して沈下収束を行った。本論文は、沈下予測方法及び宅地地盤安定化のための評価方法についての検討結果である。

キーワード : 地盤沈下、中間土、宅地造成、プレロード盛土工法、モニタリング施工

1. はじめに

上老松地区は、1級河川「肱川」の河口から約2.5km上流の汽水域に位置する。当該地では、平成19年度より洪水被害を防ぐための河川事業として、護岸及び宅地の嵩上げ造成に土地区画整理事業を導入した土地利用一体型水防災事業を開始した。(図-1、図-2)

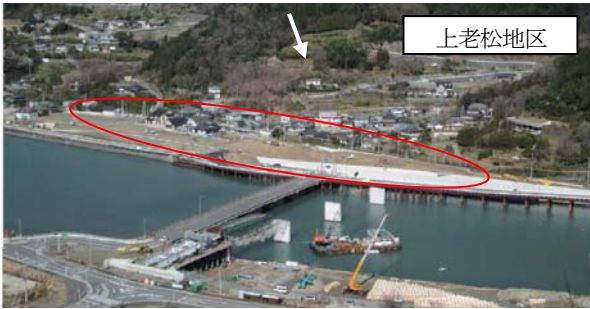


図-1 上老松地区全景

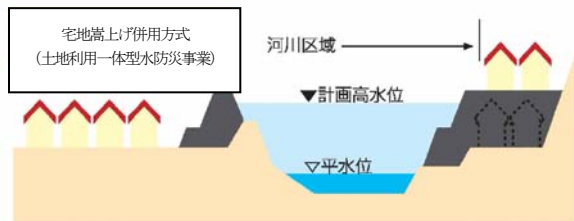


図-2 土地利用一体型水防災事業概要図

嵩上げ造成は、河川横断方向に1次盛土（山側）(H20)、2次盛土（川側）(H22)と二段階の盛土を施工するもので(図-3)、平成22年6月、2次盛土開始後、1次盛土上に建築した新築家屋が2次盛土側へ傾斜する変状が確認された。その後行った詳細調査の結果、

変状は、細砂・シルトを主体とした軟弱地盤層が、造成盛土荷重の増加により圧密沈下したものであることが分かった。圧密沈下は継続して累積傾向を示していたため、沈下を収束させ、住居移転・築堤工事・橋梁架替を完成させるために、事業期間完了を平成25年度から平成26年度へ変更した。

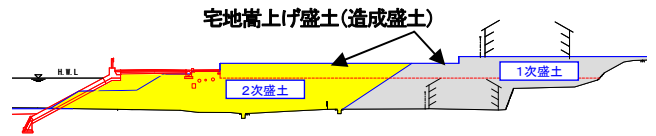


図-3 上老松地区全景

2. 詳細調査結果

(1) 地質概要

当該地の地盤層は、標高GH=0.0m以深から「暗灰色」を呈する粘性土や粗砂などを複雑に混在した細砂～シルトを主体とした多層地盤を形成していた。

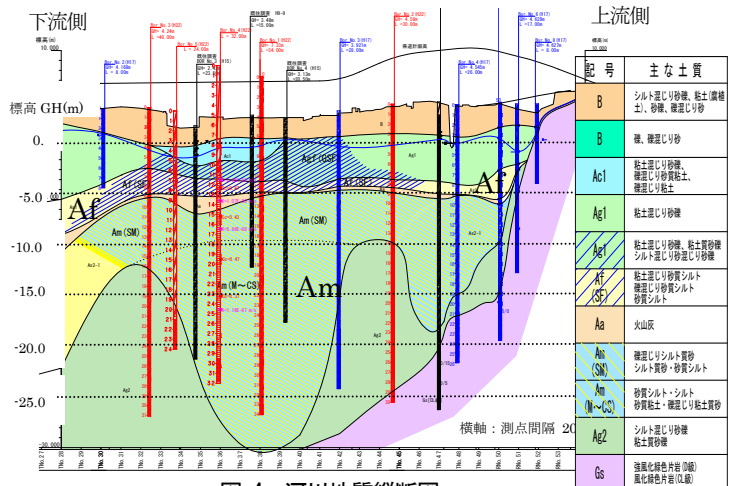


図-4 河川地質縦断図

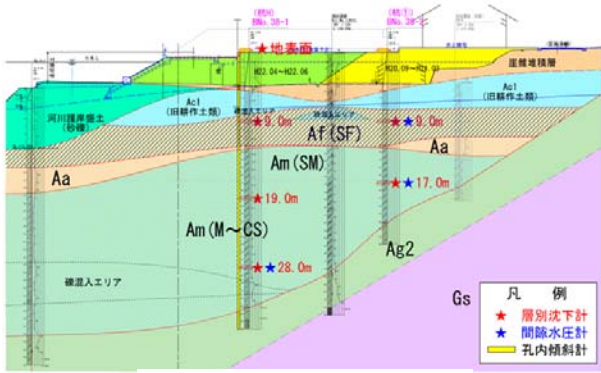


図-5 河川地質横断面

GH-5.0m付近には、薄層状に連続した火山灰層(Aa)を挟み、これを境界層として上位層は細砂～シルトが主体(Af)となり、下位層は粘性土を含むシルトが主体(Am)となっていた。これら軟弱地盤層は、河川縦断方向にスリ鉢状に堆積(図-4)し、河川横断方向へ傾斜(図-5)していることが確認された。

(2) 中間土の土質組成と力学特性

沈下対象層であるAf, Am層の代表的な土質組成・力学特性を以下に示す。(表-1)

表-1 土質組成一覧表

地層名		Af	Am
一般	含水比 Wn %	48.1	40.3
粒度	礫分 (2~75mm) %	0.1	0.1
	砂分 (0.075~2mm) %	59.0	36.1
	シルト分 (0.005~0.075mm) %	21.8	44.4
	粘土分 (0.005mm未満) %	19.1	19.4
コンスタン	液性限界 WL %	NP	51.3
	塑性限界 WP %	NP	28.5
	塑性指数 Ip	-	22.8
分類	分類記号	SM	MHS
	圧密指数 Cc	0.43	0.47
圧密	圧密降伏応力* Pc KN/m ²	275.0	284.0

DATA: No.36測線 Bor No.4 Af: GL-12.0~12.4m, Am: GL-19.0~19.7m
 圧密降伏応力* 直線法による補正值

粒度組成から、土質分類はSM~MHSと砂質土に分類されるが、図-6の粒径加積曲線に示すように、粒径がほぼ細粒土を主体としている。

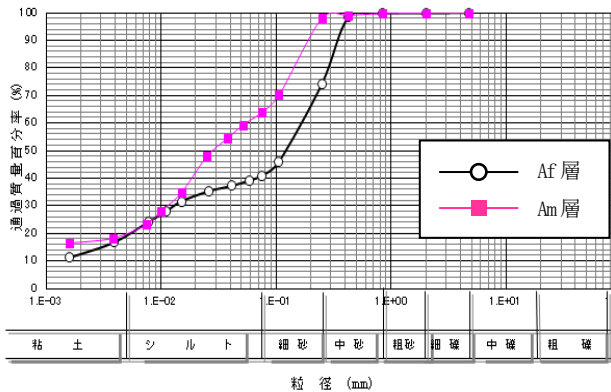


図-6 Af, Am粒径加積曲線

また、Af, Am層の現場透水試験結果は、 $K=2.65E-06 \sim 1.16E-07$ (m/s)と透水性が「非常に低い」地層、いわゆる粘性土に相当する「難透水層」を示した。このような物理的特性を有する土を「中間土」と総称されてお

り、その定義は、砂分50~80%、 $IP=NP \sim 30$ で、粘土と砂の中間的な力学特性を示すものである。

さらに、Af, Am層は、細粒土を主体とした難透水性を呈する緩い地盤であることから、地盤の圧縮特性を把握する圧密試験を実施したところ、圧縮指数は $Cc=0.43 \sim 0.47$ を示し、圧密降伏応力はほぼ正規圧密域にあり、今後圧縮する可能性があることが確認された。

これらの条件から、Af, Am層は工学的特性としては粘性土地盤として評価することが妥当だと判断した。

3. 沈下予測とモニタリング

当該地では、沈下被害後も約4mの盛土を計画しており、継続している沈下対策を含めて全体の施工計画を考える必要があった。すなわち、沈下被害と施工方法との間に関連があるため、沈下性状を考慮に入れた被害(破壊)が生じない施工方法を考えなければならなかった。

そのためには、厳密に変形あるいは沈下と時間の関係を解く必要があり、その解析には大きく2つの方法を用いて沈下予測を行った。

方法-1: 多層地盤の一次元圧密

方法-2: 土の強度特性値を導入したFEM解析

(1) 沈下予測

① 多層地盤モデルを用いた一次元圧密による沈下予測

本解析は、圧密試験結果を精査したうえで一次元圧密理論(△e法: $f - \log P$)を用いて圧密沈下量を推定するものである。

ただし、当該地のように不均質な多層地盤の圧密過程を算出するために、各地層の深度毎の応力状態 σ と圧縮性 Δe の関係を整理し、式(1)により沈下量を算出。

沈下時間は、多層地盤による地下水排除の複雑化に対して、多層地盤を1層と仮定した圧密係数 Cv' を各応力状態 σ と透水係数 K ・体積圧縮係数 mv の関係を整理し、式(2)から算出して沈下時間を求めた。

$$S = \Delta \epsilon \times Hi = (fi - ff) / fi \times Hi \quad \dots \text{式 (1)}$$

ここに Hi : 軟弱地盤層厚

fi : 荷重 P の体積比

ff : 荷重 P +増加荷重 ΔP 時の体積比

$$Cv' = K' / (mv' \times K) \quad \dots \text{式 (2)}$$

ここに地層数を n とした時

Cv' : 見掛けの圧密係数

K : 各地点の透水係数 (m/day)

K' : 透水抵抗

$$K' = (1 / \sum (1/kn) \times dn) / n$$

Kn : ある地層の透水係数

dn : ある地層深さ

mv' : 見掛けの体積圧縮係数

$$mv' = \sum mv / n$$

②FEM解析 (MMXモデル) を用いた地盤変形予測

本解析は、盛土による地盤変形(沈下・破壊)を予測・監視する指標として二重負荷面型双曲線モデル(MMXモデル)を用いて実施した。

表-2 MMXモデルの構成式一覧

特性	数式
弾性	ポアソン比: $\nu=K_0/(1+K_0)=0.33$... (1)
	ヤング率: $E=E_0(G_m/P_0)^{E_0}$... (2)
	E_0, EN : 実験定数, K_0 : 静止土圧係数 P_0 : 次元を合わせるための定数=0.1MPa(10kgf/cm ²)
塑性圧縮	負荷関数: $f_c=f_c$... (3)
	塑性ポテンシャル: $g_c=f_c^2/2$... (4)
	硬化関数: $F_c=f_c(K_{c1}+K_{c2})=0$... (5)
	降伏値: $\kappa_{c1}=0, \kappa_{c2}=f_c$... (6)
	硬化パラメータ: $f_c \propto v; \kappa_{c1}=f_c$... (7)
塑性せん断	$\tau_{\alpha}=1/\sqrt{(G_{\alpha} \cdot f_{\alpha})^2 + (R_f \tau_{\alpha})^2}$... (8)
	$R_f = \tau_{\alpha} / B_{\alpha}, B_{\alpha}$: 双曲線の漸近線 ... (9)
	$E_{\alpha} = 2 \cdot (1 + \mu) G_{\alpha}, \mu = 0.33$... (10)
	$G_{\alpha} = A_{\alpha} \cdot (G_m P_0)^{A_{\alpha}} [1 - (\tau_{\alpha} \cdot R_f / \tau_{\alpha})^2]$ A_{α}, SN : 実験定数

上記2方法を用いて、沈下および変形を予測した結果(図-7、図-8)、盛土後からの観測実測値と予測値がほぼ一致する結果が得られた。

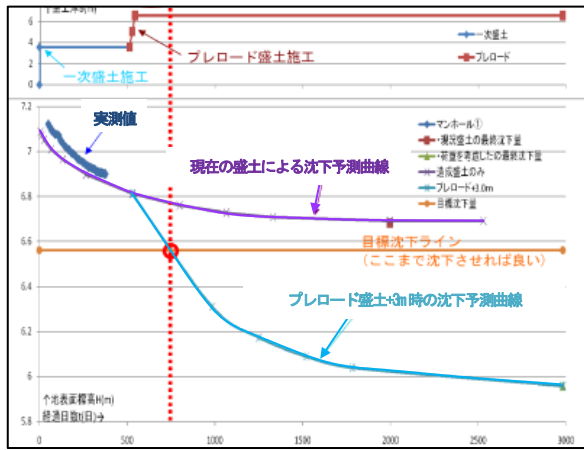


図-7 一次元圧密沈下予測と実測値

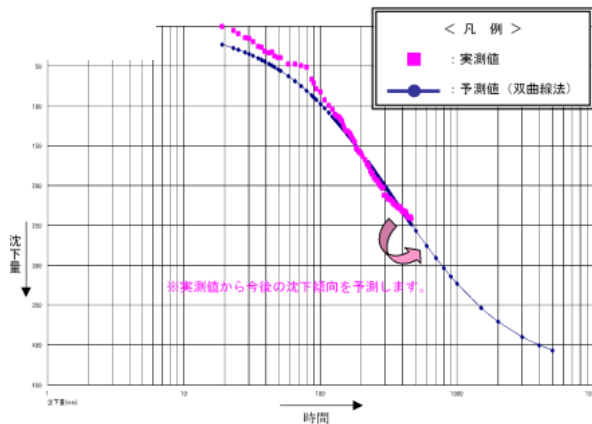


図-8 双曲線法による予測値と実測値

以上の結果より、沈下予測が可能と判断した。

(2)プレロード盛土工法の選定

地盤沈下対策工法については、(1)の結果から沈下予測が可能と判断し、施工期間の短縮と経済性を検討した結果、圧倒的に有利なプレロード盛土工法を採用した。

なお、プレロード盛土高さは安定性および周辺環境を考慮した最大高さ(H=3.0m)とした。

また、当該地のように砂分を含有する地質においては、沈下の過程において土粒子の密度が密となり「せん断強度」が増加することで、液状化抵抗値が大きくなる相乗効果も得られる。

(3)モニタリング

①モニタリング内容

沈下予測と現状把握のために以下の機器を設置した。

■地表面沈下計、層別沈下計、間隙水圧計

リアルタイムな沈下データから圧密状態を把握し、プレロード盛土荷重の増減および撤去判断に用いる。

■孔内傾斜計

盛土による軟弱地盤層の横方向すべりなどの変位データから盛土施工の継続や中止を判断する。

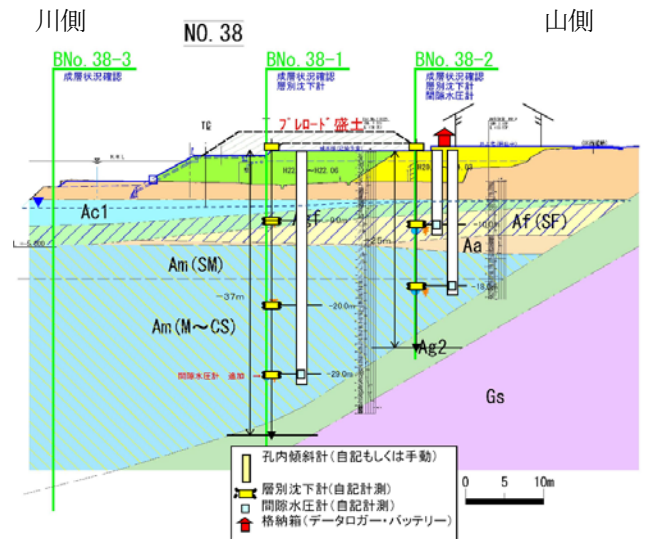


図-9 計測機器設置図

(No. 38 測線地質断面図)

②観測頻度

動態観測の頻度と期間は、様々な文献で提唱されている測定頻度を参照し、表-3 に示すように行った。

表-3 動態観測頻度

計測機器	期間	載荷工法 施工中	載荷工法施工後			維持管理段階			
			最初の 1か月	1か月~ 2か月	2か月~ 3か月	載荷工法 除荷後	供用後		
沈下測定	地表面沈下板	1回/日	2回/週	1回/週	3回/月	2回/月	1~2回/月	2~4回/年	1回/年
	層別沈下計	1回/日				2回/月	1~2回/月	2~4回/年	1回/年
変位測定	地表面変位杭	-	2回/週	1回/週	3回/月	2回/月	1~2回/月	2~4回/年	1回/年
	孔内傾斜計	2回/週				1回/月	必要に応じて実施	必要に応じて実施	
水圧測定	間隙水圧	2回/週	2回/週	1回/週	3回/月	1回/月	1~2回/月	必要に応じて実施	

4. プレロード盛土除荷基準

(1) プレロード盛土施工速度

盛土速度は、「道路土工 軟弱地盤対策工指針」では、地盤条件に応じて3~10cm/dayとされている。当該地では、トータル的にその盛土速度を超えない範囲で図-10に示す盛土工程計画を立てた。また、施工中の盛土の安定度評価は、FEM変形予測と孔内傾斜計の地中変位の動向を見るほか、観測結果図-11に示す「S-δ法」を用いた。

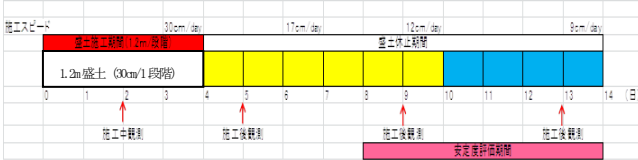


図-10 プレロード盛土作業工程

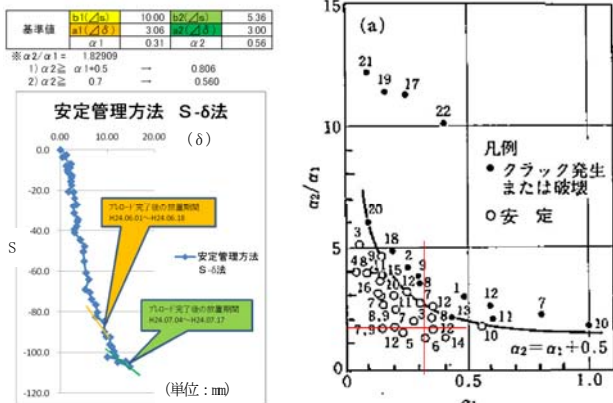


図-11 盛土安定度評価 (S-δ法)

(2) プレロード盛土の除荷基準

粘性土地盤上に新たに盛土を施工すると、粘性土層の圧密沈下が徐々に進んでいく。このような圧密現象は、圧密理論により説明することが一般的であり、圧密の進行の度合いを圧密度で表す。ある盛土荷重に対して圧密度100%であれば、圧密が完全に終了したことを意味し、この盛土荷重に対して沈下が進行しない状態にあると評価できる。圧密度が100%未満の場合には、圧密(沈下)が継続することを意味するが、95%を目安に圧密が十分に進行したかを判断することが多い。

ここでは、宅地造成盛土であり、残留沈下を残さない地盤とするために、地盤安定評価として下記の条件を設定した。

- 条件1: 事前解析値である沈下量(圧密度)を満足すること。
- 条件2: 実測値が圧密曲線定規にフィッティングする状態であること。
- 条件3: 実測値が双曲線法(S-logt法)で変曲点が確認できていること。
- 条件4: 圧密度95%(TV=1.5)以上となる放置期間を満足していること。
- 条件5: 上記4条件を満足した際、プレロード実施箇所で強度増加が得られていること。

5. 判定結果

プレロード完了後の沈下量は、予測値とほぼ一致しており、条件1~4を満たしことも確認した。(図-12~14、表4)

また、各深度毎の継時変化から双曲線法により圧密度を算出すると、プレロード盛土荷重に対して62.6~95.4%であった。これらの値を宅地荷重に対する圧密度に換算すると、1箇所(99%)を除いた全ての箇所・深度において100%を超えていることが確認された。(表-5)

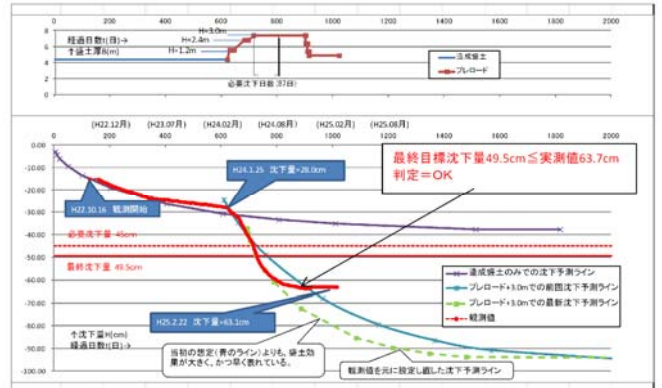


図-12 一次元圧密沈下予測と実測値の関係図 (DATA:No. 38-1)

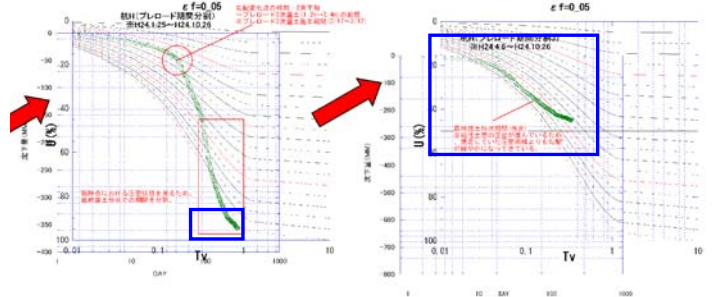


図-13 圧密曲線定規と実測値の関係図 (DATA:No. 38-1)

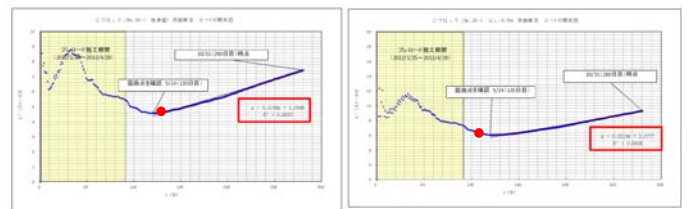


図-14 双曲線法(S-logt法)と実測値の関係図 (DATA:No. 38-1)

表-4 一次元圧密沈下予測とプレロード放置期間

DATA	観測値					最終沈下量 (mm)	観測値/予測値 (%)	プレロード後の地盤強度増加率 (%)	プレロード後の地盤強度増加率 (TV)	プレロード後の地盤強度増加率 (TV)	プレロード後の地盤強度増加率 (TV)
	観測値 (mm)	予測値 (mm)	観測値 (mm)	予測値 (mm)	観測値 (mm)						
1	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
...
プレロード+1.0m	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
プレロード+2.0m	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
プレロード+3.0m	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

※(1)条件1,2,3,4の観測値に比べて1%以内の誤差を認める。TV=1.5以上を判定基準とする。

表5 プレロード盛土除荷判定結果一覧表

測線	NO.29-1			NO.29-2					
	沈下量 (mm)	沈下状況	判定	沈下量 (mm)	沈下状況	判定			
最終目標値を定めた際の目標値	最終目標	495	過剰沈下	253	過剰沈下	○			
	地表	637	142	370	117	○			
	リバウンド量	630	7	367	3	○			
圧密促進による圧密率の向上	即時沈下中	圧密沈下中	判定	即時沈下中	圧密沈下中	判定			
	地表	○	○	○	○	○			
	上層	○	○	○	○	○			
	中層	○	○	○	○	○			
圧密促進による圧密率の向上	実測点の有無	双曲線法の有与率	判定	実測点の有無	双曲線法の有与率	判定			
	地表	有	0.9933	有	0.9938	○			
	上層	有	0.9896	有	0.9886	○			
	中層	有	0.988	有	0.9796	○			
圧密促進による圧密率の向上	形状排水	必要日数	載荷経過日数	判定	必要日数	載荷経過日数	判定		
	間隔	89	186	186	10	186	○		
圧密促進による圧密率の向上	初期沈下率	中期沈下率	圧密促進率	判定	初期沈下率	中期沈下率	圧密促進率	判定	
	上層	0.124	0.134	82.5%	0.083	0.148	56.1%	○	
	中層	0.256	0.289	88.6%	0.190	0.225	84.4%	○	
	下層	0.182	0.351	51.9%	0.097	0.168	57.7%	○	
圧密促進による圧密率の向上	全層平均	67.5%	33.0%	○	66.1%	11.1%	○		
	区間名	沈下対象層	各区間における圧密率	判定	区間名	沈下対象層	各区間における圧密率	判定	
	上層	GL.0.0~9.0m	4.0m	95.4%(144.0%)	○	GL.0.0~9.0m	4.0m	86.7%(134.4%)	○
	中層	GL.-9.0~-19.0m	10.0m	89.1%(134.5%)	○	GL.-9.0~-17.0m	8.0m	83.3%(129.2%)	○
圧密促進による圧密率の向上	下層	GL.-19.0~-28.0m	9.0m	77%(116.2%)	○	GL.-17.0m~-22.2m	5.2m	71.6%(111.0%)	○
	全層	GL.-28.0m~-32.2m	5.2m	65.6%(99.0%)	○				
	※(○)の圧密率は、計測標準+実測値に対する値を示す。			84.1%(123.3%)	○	※(○)の圧密率は、計測標準+実測値に対する値を示す。		80.7%(124.9%)	○
地盤の強度増加の判定	初期強度	必要強度	判定	初期強度	必要強度	判定			
	上層 AF	196.2	180.6	218.0	○				
	中層 Am上	224.1	194.6	230.6	○				
	下層 Am下	227.6	279.8	334.0	○				

さらに、必要放置日数を満足し、かつ圧密状態を確認後の地盤強度（圧密降伏応力）を調査した結果、造成盛土+家屋荷重（10kN/m²）を考慮した有効応力荷重以上を示す強度増加が確認され（図-16）、当該地軟弱地盤は造成盛土計画に対して過圧密状態の地盤を形成したと判断した。

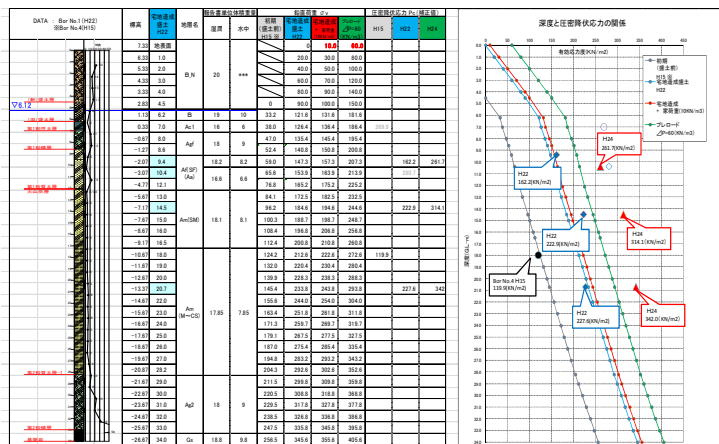


図-16 強度増加比較図 (DATA: No. 38-1)

その後、プレロード荷重を除荷したところ、一般的にリバウンド量は沈下量の1/5~1/10と言われており、リバウンド量が大きければ残留沈下も大きくなるが、当該地での沈下量は63.7cmに対して7mmとリバウンド量1/90と非常に小さく、しかも短期間に安定した状態となった。この原因としては、中間土が砂の性質も有して

いることから、粘土のような給水膨張が発生せず、圧縮されたままの状態を終息したものと考えられる。

6. おわりに

当該地盤のような沖積世の軟弱地盤層は、砂と粘性土の両方の性質を持つ可能性があり、このような地層はその地層毎に特性を見極めることが重要で、「中間土」という考えを積極的に取り入れる必要がある。

当該地では、平成22年度~平成24年度の約2年間に渡り綿密な地質調査とモニタリングを実施することで、プレロード盛土工法による確実な圧密促進を評価できた。また、モニタリングの結果からも、中間土地盤にプレロード盛土工法を実施すると、「確実な強度増加」が得られることがわかった。さらに、中間土地盤に対する荷重除荷後のリバウンド量が小さいという特性からは、プレロード工法が軟弱地盤対策として確実性の高い有効な手法になると言える。

しかしながら、プレロード盛土工法においては現在の最高の技術をもってしても圧密現象を精度良く予測することは困難であるため、当該地では施工完了後も当面の間（平成28年度頃まで）はリバウンドや残留沈下に対するモニタリングを継続することとしている。

今後、この経験・結果が、設計・施工において中間土に対する工学的特性の設定や、さらにはプレロード盛土工法による変位予測、除荷判定手法などの基礎資料となり、これからの事業の一助となれば幸いである。

謝辞

モニタリングや変位予測、除荷条件の設定等を行うにあたり、様々な助言を頂きました土木研究所の方々と徳島大学 望月秋利名誉教授に対し、この場をお借りして御礼申し上げます。

また、上老松地区の方々には家屋の傾斜被害及び事業計画変更により、多大なるご不安とご苦勞をおかけしたことをこの場を借りてお詫び申し上げますとともに、ご協力頂いたことに深く感謝申し上げます。今後とも地元の方々に安心して暮らして頂けるよう尽力して参ります。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路土工 軟弱地盤対策工指針
- 2) 地盤工学会：土質試験の方法と解説
- 3) 地盤工学会：軟弱地盤対策入門
- 4) 地盤工学会：土の圧密入門
- 5) 地盤工学会：盛土の調査・設計から施工まで
- 6) 土質工学会：ジオテクノノート 中間土
- 7) 土質工学会：土質工学ハンドブック 土の圧縮と圧密
- 8) 土質工学会：現場計測計画の立て方
- 9) 寒地土木研究所 泥炭性軟弱地盤対策工マニュアル
- 10) 熊潔、望月秋利、馬陰峰、平塚正純（2002）二重負荷型双曲線モデルと砂地盤上の帯状基礎支持力特性