

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、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による水防災盛土及び宅地造成盛土（大洲市）のための1次盛土（山側）後に家屋を建築したところ、2次盛土（川側）時に連れ込み沈下被害が生じた。詳細調査の結果、地層がすり鉢型に分布した複雑な地盤であること、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であることが解明された。そこで、限られた工期内で宅地造成を目的とした基準内に沈下量を収束させ、軟弱地盤を安定させるための方法として、観測施工法を併用したプレロード盛土工法（載荷盛土工法）を採用して沈下収束を行った施工事例及び評価方法について報告する。

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、洪水被害を防ぐため平成20年度より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が開始された。



図-1 上老松地区全景

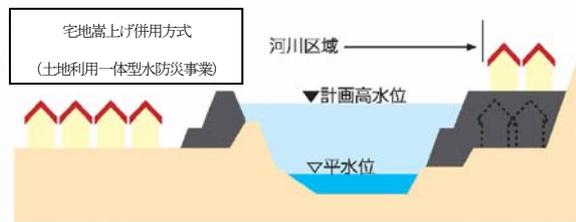


図-2 土地利用一体型水防災事業概要図

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-6）、2次盛土開始時に、1次盛土後に建築した新築家屋が2次盛土側（川側）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（中

間土）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、事業期間を平成25年度から平成26年度へ変更した。

2. 詳細調査結果

(1) 地質概要

当該地の中間土は、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。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～シルトを主体（Af）とし、下位層は粘性土を含むシルトを主体（Am）としていた。これら中間土層は、図-3に示すように河川縦断方向にすり鉢状に堆積し、河川横断方向へ傾斜していることが確認された。（図-6）

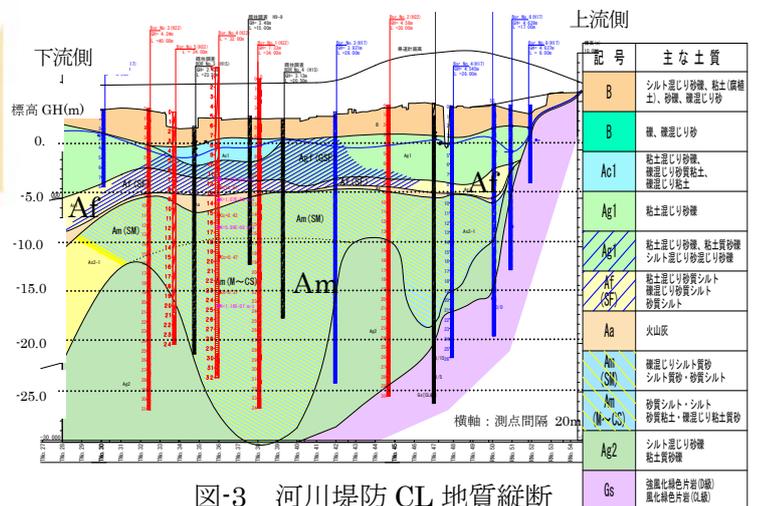


図-3 河川堤防CL地質縦断

(2) 中間土の土質組成と力学特性

沈下対象層である中間土 (Af, Am) 層の代表的な土質組成・力学特性を下表に示す。

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	粒径 (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
コンシステン	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	圧密指数 Cc	0.43	0.47
	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-4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。

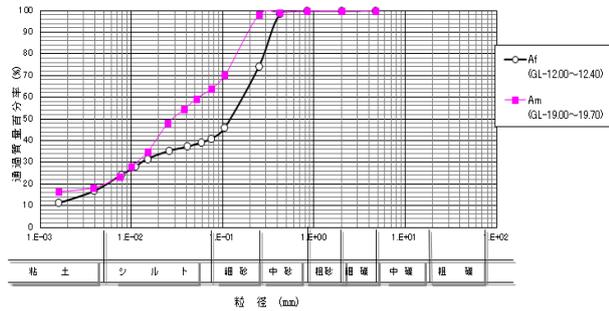


図-4 Af, Am粒径加積曲線

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」を示す。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、圧密指数は $Cc=0.43 \sim 0.47$ 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、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△P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: $E = E_0 (\sigma_n / P_0)^n$... (2)
	E_0, n : 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(1.0kgf/cm ²)
塑性圧縮	荷重関数: $f = I_1$... (3)
	塑性ポテンシャル: $g = I_1^2 - 2I_2$... (4)
	硬化関数: $F = f - (\kappa_0 + \kappa_1) = 0$... (5)
	降伏値: $\kappa_0 = 0, \kappa_1 = f(H)$... (6)
	硬化パラメータ: $H = v, \kappa_1 = f_c$... (7)
塑性せん断	$\tau_{\alpha} = 1 / [1 / (G_{\alpha} \cdot f_{\alpha}^{\mu}) + (R_f / \tau_{\alpha})]$... (8)
	$R_f = \tau_{\alpha} / B_{\alpha}, B_{\alpha}$: 双曲線の漸近線
	$E_s = 2 \cdot (1 + \mu) G_s, \mu = 0.33$... (9)
	$G_{\alpha} = A_{\alpha} \cdot (\sigma_n / P_0)^{\mu} [1 - \tau_{\alpha} / R_f / \tau_{\alpha}]^2$... (10)
	A_{α}, μ : 実験定数

上記2方法を用いて、沈下および変形 (図-5、図-9) を予測した結果、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。

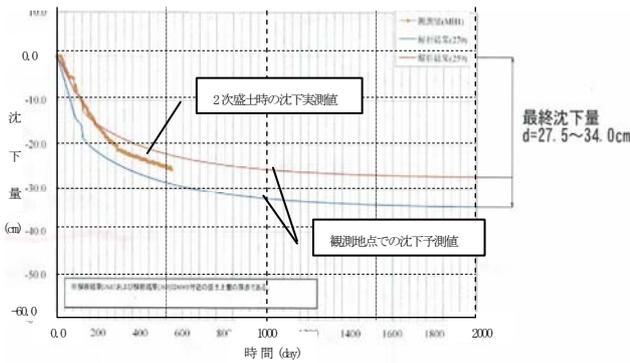


図-5 FEM解析による変形予測と実測値の関係 (No. 38)

(2) プレロード盛土工法の選定

地盤沈下対策は、(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) にした。

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をするため下記の機器を設置した。

■ 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。

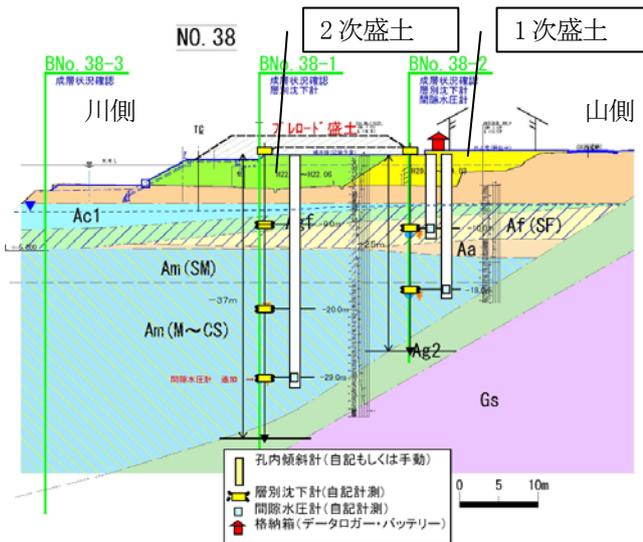


図-6 計測機器設置図 (No. 38 測線地質断面図)

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	3か月 以降	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/月	1~2回/月	2~4回/年	1回/年
	層別沈下計	1回/日				2回/月			
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	-				1回/月		必要に応じて実施	
水圧測定	間隙水圧	2回/週				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-7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に、観測結果図-8に示す「S-δ法」を用いた。

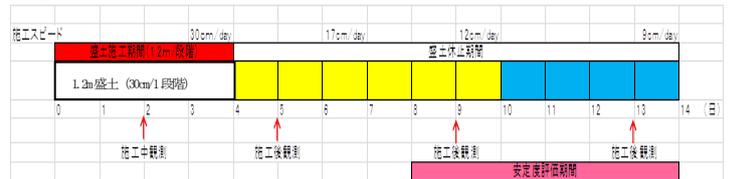


図-7 当該地プレロード盛土作業工程

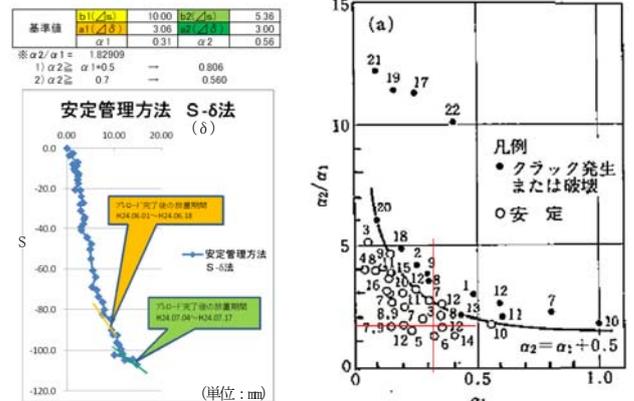


図-8 盛土安定度評価 (S-δ法)

(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掲げた。

- 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いた(図-9)。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。

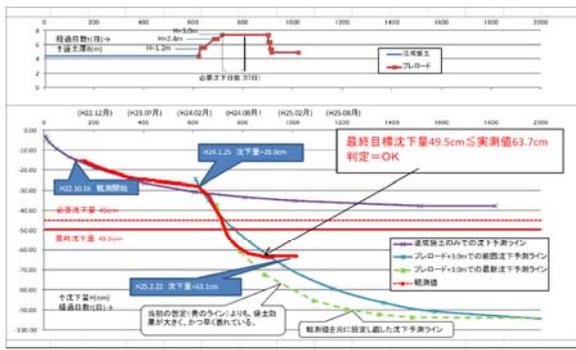


図-9 一次元圧密予測沈下と実測値の関係図(DATA:No.38-1)

表-4 プレロード盛土除荷判定結果一覧表

測 験	NO.38-1			NO.38-2			備 考			
	沈下量 (mm)	沈下状況	判定	沈下量 (mm)	沈下状況	判定				
最終目標	495	過剰沈下	○	253	過剰沈下	○	全地点において、実測沈下量が最終目標沈下量を達成している。			
地表	637	142	○	370	117	○				
リバウンド量	630	7	○	367	3	○	プレロード除荷後のリバウンド量(最大値)。			
圧密曲線のフィッティング	即時沈下中	圧密沈下中	判定	即時沈下中	圧密沈下中	判定	全地点において、実測沈下量が圧密曲線とフィッティングしている。			
	地表	-	○	-	○	○				
	上層	-	○	-	○	○				
	中層	-	○	-	○	○				
下層	-	○	-	-	-	-				
変曲点の有無	変曲点の有無	圧縮線の半々	判定	変曲点の有無	圧縮線の半々	判定	各地点、各観測深度において変曲点を検出するとともに、プレロード土質による圧密状態となっていることを確認。			
	地表	有	0.9933	有	0.9938	○				
	上層	有	0.9896	有	0.9898	○				
	中層	有	0.9888	有	0.9795	○				
下層	有	0.9661	-	-	-	-				
圧密後90%	想定沈下	必要日数	観測経過日数	判定	必要日数	観測経過日数	判定	全地点でプレロード盛土の放置期間(必要日数)以上の日数を確保されていることを確認。		
	両面	89	186	○	両面	10	186		○	
	上層	0.124	0.124	92.5%	両面	0.083	0.148		86.1%	
	中層	0.236	0.289	88.6%	下層	0.190	0.225		84.4%	
下層	0.182	0.251	51.9%	全層	0.097	0.168	57.7%			
全層	0.075	0.203	36.9%	上層	67.5%	33.0%	○	66.1%	11.1%	○
圧密率	区 画 名	沈下対象層	圧密率(%)	判定	区 画 名	沈下対象層	圧密率(%)	判定		
	上層	GL-0.0~9.0m	4.0m	89.4%(144.0%)	GL-9.0~17.0m	4.0m	88.7%(134.4%)	○		
	中層	GL-9.0~19.0m	10.0m	89.1%(134.5%)	GL-17.0m~22.0m	5.0m	83.3%(129.2%)	○		
	下層	GL-19.0~28.0m	9.0m	77%(118.2%)	GL-22.0m~32.0m	10.0m	71.8%(111.0%)	○		
全層	GL-0.0~32.0m	32.0m	65.6%(99.0%)	全層	84.1%(123.3%)	80.7%(124.9%)	○			
地盤の強度	地盤	初期強度	必要強度	判定	増加強度	必要強度	判定	初期圧密状態および、バックにはあるものの有効応力増加に伴って増加している。プレロード盛土による圧密促進効果を確認。プレロード盛土後、各深度での強度増加を確認。全層において増加している。観測層中央部から下層にかけての強度増加が小さい傾向にある。この要請として、観測層の不均一、圧密に伴う土質の不均一が原因と推定される。		
	上層	AF	196.2	160.0	218.0	218.0	○			
	中層	Am上	222.9	194.6	230.6	214.1	○			
	下層	Am下	227.6	279.6	234.0	234.0	○			

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、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された。

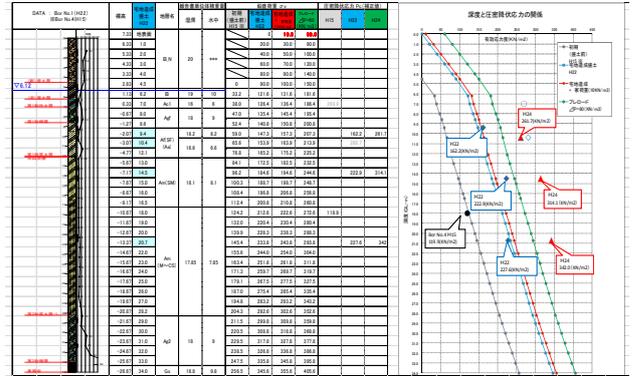


図-10 強度増加比較図(DATA: No.38)測線

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。ただし、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。そのため、施工完了後も当面の間(平成28年度頃まで)、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労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。

参考文献

- 1) 日本道路協会: 道路土工 軟弱地盤対策指針
- 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
- 4) 地盤工学会: 盛土の調査・設計から施工まで
- 5) 土質工学会: ジオテクノノート 中間土
- 6) 土質工学会: 土質工学ハンドブック 土の圧縮と圧密
- 7) 土質工学会: 現場計測計画の立て方
- 8) 寒地土木研究所 泥炭性軟弱地盤対策マニュアル
- 9) 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